

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

**Implementace metod snímání objektů ve 3D pro
účely strojového vidění**

**Implementation of Methods for 3D Object Detection
for Machine Vision Purposes**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Pavel Kodytek

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612T041 Řídicí a informační systémy

Téma:

Implementace metod snímání objektů ve 3D pro účely strojového vidění
Implementation of Methods for 3D Object Detection for Machine
Vision Purposes

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je implementace základních algoritmů triangulace a stereometrie pro účely strojového vidění. 3D kamera je zařízení, které provádí sejmутí reliéfu objektu jednou z řady možných metod vybranou výrobcem kamery. Ekvivalentním použitím 3D kamery může být vytvoření vlastního detekčního 3D systému, využívající matematické triangulace laserové promítané stopy na předmět a její deformace. Stopa je snímána jednou kamerou a z ní je odvozována výška profilu. Tato metoda je výpočetně jednodušší než stereometrie, která potřebuje obraz ze dvou kamer, ale nepotřebuje promítanou laserovou stopu. Pro různé povrchy se hodí různé přístupy a cílem této práce by mělo být zhodnocení jednotlivých přístupů a vhodnosti pro jednotlivé typy povrchů.

Body zadání:

1. Seznámení se s principy snímání objektu pomocí 3D kamery, triangulace a stereometrie.
2. Popis vývojových prostředí používaných pro návrh kamerových systémů - přehled a charakteristika.
3. Návrh klíčových algoritmů.
4. Implementace úloh v grafickém programovacím jazyku LabVIEW.
5. Odladění a porovnání.
6. Ověření funkce a zhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BRESS, Thomas J. *Effective labview programming*. 1st ed. Allendale: NTS Press, 2013, 701 s. ISBN 1934891088.
- [2] HLAVÁČ, Václav a Milan ŠONKA. *Počítačové vidění*. Praha: Grada, 1992. ISBN 80-85424-67-3.
- [3] ŠONKA, Milan, Václav HLAVÁČ a Roger BOYLE. *Image processing, analysis, and machine vision*. 3rd ed. Toronto: Thomson, 2008, xxv, 829 s. ISBN 978-0-495-08252-1. Dostupné také z: <http://www.engineering.uiowa.edu/~dip/LECTURE/lecture.html>.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

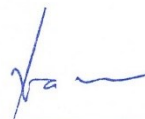
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Bilík, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry

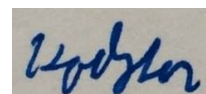


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 23. dubna 2018



podpis studenta

Poděkování:

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce doc. Ing. Petru Bilíkovi, Ph.D. za cenné rady a pomoc při zpracovávání této diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za oporu a zázemí.

Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o různých metodách získání 3D projekce reálného světa pro účely strojového vidění. Konkrétně se jedná o algoritmy triangulace a stereometrie, tedy měření vzdálenosti pomocí vícebodového systému, a „Time of Flight“ kamer, které měří absolutní dobu letu světla k cíli a zpět. Na základě této vzdálenosti poté kamera vypočte skutečnou vzdálenost k předmětu. Součástí práce je i matematický rozbor spolu s navržením algoritmů pro jednotlivé úlohy, a hlubší porovnání výpočetních metod pro vyhodnocení stereometrických snímků. Praktické provedení je implementováno v grafickém vývojovém prostředí LabVIEW, jež je nazýváno programovacím jazykem typu G. Výsledky metod jsou následně srovnány podle vstupních kritérií a výpočetních časových komplexností.

Klíčová slova

LabVIEW, Triangulace, Stereometrie, Time of Flight kamera, Reliéf terénu, Vzdálenost objektů, zpracování obrazu, strojové vidění

Abstract

This thesis describes different methods which are used to acquire a 3D image projection of real world, with a main goal to use this image for a machine vision processing. Specifically, the thesis is about algorithms of triangulation, stereometry, that are based on a multipoint system, and a Time of Flight camera. Those cameras are specially designed to measure the time of traveling light to and from object, and later evaluate the real distance of the object in the space. Part of the thesis is dedicated to a mathematical model of the image processing used in computation algorithms of stereometry and triangulation, as well as a general theory of image processing. This is concluded with a deeper explanation of methods that are used for stereometry image processing. Practical part is created in development environment LabVIEW, that represent graphical programming or G language, and results of different methods are concluded based on the input arguments, and mathematically modeled complexity of evaluation process.

Keywords

LabVIEW, Triangulation, Stereometry, Time of Flight Camera, Terrain Relief, Distance of Objects, machine vision, image processing

Obsah

Obsah	8
Seznam použitých symbolů a zkratek	10
Úvod	11
1 Teorie obrazu	14
1.1 Reprezentace signálů v obraze a jeho základní charakteristiky	15
1.1.1 Barevný model	15
1.1.2 Jas a hloubka obrazu	16
2 Vývojová prostředí používaná pro analýzu obrazu	18
2.1 Matlab	18
2.2 OpenCV	18
2.3 LabVIEW	18
3 Metody získání hloubky scény	20
3.1 Time of Flight kamery	20
3.2 Triangulace	22
3.3 Výběr metody	22
3.4 Vymezení základních pojmů	24
4 Stereometrie	25
4.1 Zjednodušený matematický model	26
4.2 Výpočet disparity	29
4.2.1 Stochastický přístup k obrazu	29
4.2.2 Výpočet míry podobnosti	30
4.2.3 Určení finální optimální disparity	31
4.2.4 Semi Global Matching	32
Pathwise aggregation	33
4.3 Epipolární geometrie a rektifikace obrazu	34

4.3.1	Fundamentální matice	34
4.3.2	Epipolární linie.....	35
5	Získané výsledky ToF / 3D kamery :	37
5.1	ToF kamera.....	37
6	Algoritmus a výsledky Triangulace.....	39
6.1	Algoritmus výpočtu hloubkové mapy při triangulaci	39
6.2	Předzpracování	40
7	Praktické provedení stereometrie	45
7.1	Výpočet fundamentální matice.....	45
7.2	Výpočet disparity.....	47
7.2.1	Block matching	47
7.2.2	Block matching jako energetická funkce	48
7.2.3	Graph cuts.....	49
7.2.4	Dynamické programování	50
7.3	Finální realizace.....	51
8	Porovnání metod.....	55
	Závěr	58
	Seznam použité a studované literatury.....	60
	Přílohy	63

Seznam použitých symbolů a zkratk

Zkratka	Význam
ToF	Time of flight -> Kamera s měřením doby letu
LabVIEW	Programovací prostředí (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench)
GUI	Graficko uživatelské rozhraní (Graphical User Interface)
MATLAB	Vývojové prostředí (MATrix LABoratory)
NI	National Instruments
RGB	Barevný prostor složený ze tří barev: červená, zelená, modrá
SubVI	Podprogram VI (Virtual Instrument)
SW	Programové vybavení (Software)
VI	Virtual Instrument – V LabVIEW se jedná o spojení front panelu s blokovým diagramem

Seznam ilustrací

Obrázek 1: reprezentace modelu RGB v levo a CMYK v pravo [1]	16
Obrázek 2: Reprezentace modelu HSV [1]	16
Obrázek 3: Princip fungování ToF kamery [2].....	21
Obrázek 4: Triangulační systém	22
Obrázek 5: Blokové schéma stereometrie [15].....	25
Obrázek 6: Projekce obrazu při použití jedné kamery	26
Obrázek 7:Použití dvou kamer [17].....	27
Obrázek 8:Přenesení stereometrie do 2D roviny vidění (zjednodušený přístup).....	28
Obrázek 9: Zobrazení úrovní disparity [18]	29
Obrázek 10:Příklad rozdělení obrazu podle block matchingu [26]	32
Obrázek 11:Zobrazení osmi optimalizačních cest k každému pixelu [11]	33
Obrázek 12: Demonstrace epipolární linie	36
Obrázek 13: ToF640-20gm	37
Obrázek 14: Získaná hloubková mapa při střední vzdálenosti pozorovaných předmětů 3 metry.	37
Obrázek 15: Zobrazení získaného obrazu do 3D grafu z čelního pohledu	38
Obrázek 16: Srovnání hloubkové mapy ToF kamery při střední vzdálenosti předmětů 70 cm.....	38
Obrázek 17: Použitá konstrukce k ověření algoritmů triangulace	39
Obrázek 18: Diagram výpočtu hloubkové mapy triangulace	39
Obrázek 19: realizace výpočtu hloubkové stopy při triangulaci.....	40
Obrázek 20: Snímaný předmět pro ověření triangulačních algoritmů.	40
Obrázek 21: Získaný obrázek pro výpočet triangulace spolu s detailem laserové čáry	41
Obrázek 22: Algoritmus Dilatace v programovém prostředí LabVIEW	41
Obrázek 23: Výsledek po předzpracování obrazu	42
Obrázek 24: Výpočet gradientu v Y ose obrazu	43
Obrázek 25: Výškový profil triangulace pro jeden obrázek a v 3D prostoru.....	43
Obrázek 26: Obrázek snímané scény spolu s získanou hloubkovou mapou.	44
Obrázek 27: Obrázek vykreslení výškového profilu snímaných předmětů	44
Obrázek 28: Diagram výpočtu stereometrie.....	45
Obrázek 29: Vytvoření korespondujících bodů v obrazech	45
Obrázek 30: Zobrazení epipolárních linií.....	46
Obrázek 31: Blokový diagram aplikace pro výpočet fundamentální matice.....	46
Obrázek 32: Referenční snímky pro pravou a levou kameru	47

Obrázek 33: Realizace základní výpočetní matematiky pro interní určení Block Matchingu jednoho pixelu z celého obrazu.	47
Obrázek 34: Výsledek block matching algorytmu.....	48
Obrázek 35: Block matching jako energetická funkce.....	49
Obrázek 36: Výsledek algorytmu založeném na graph cuts segmentaci.....	50
Obrázek 37: Výsledek dynamického programování	50
Obrázek 38: Aplikace platformy pro strojové vidění, přizpůsobené k zobrazení 3D grafu ze stereometrie	51
Obrázek 39: použitá konstrukce pro stereometrii	52
Obrázek 40: Levý a pravý snímek získaný z kamer v binokulárním postavení	52
Obrázek 41: Pozorovaná scéna	53
Obrázek 42: Levý a pravý snímek pořízený z kamer po rektifikaci spolu se získanou hloubkovou mapou.	53
Obrázek 43: Projekce reliéfu do 3D grafu z čelního a bočního pohledu.....	54

Úvod

Tématem, které jsem si zvolil pro svou diplomovou práci je snímání objektů ve 3D pro účely strojového vidění. Jelikož jsem již od bakalářské práce zainteresován do problematiky strojového vidění a zpracování obrazu, rozhodl jsem se pokračovat v této odborné oblasti a navázat na svou bakalářskou práci. Součástí této práce je nastudování potřebných matematických metod sloužících k popisu problematiky, která se při transformaci z 2D prostoru kamery do 3D prostoru světa stává složitější než při zpracování 2D obrazu.

V úvodní části práce se věnuji základním charakteristikám strojového vidění, popisu obrazu, a definuji základní matematické vztahy pro práci s obrazovou informací. Součástí práce je taktéž popis prostředí a programů používaných k zpracování obrazu. Následně jsou popsány různé metody získání hloubky snímání scény. Jsou zde popsány a zdůvodněny metody snímání pomocí metod triangulace a stereometrie a zároveň popsán princip fungování kamery s měřením doby letu.

Při měření pomocí kamery s určením doby letu, se na rozdíl od matematických metod vykonávaných nad obrazem, jedná o využití fyzikální podstaty světla. Metoda triangulace již nevyužívá fyzikálního principu, ale zaměřuje se na deformaci světelné stopy, většinou laserového paprsku v prostoru. Tato deformace je dána výškou sledovaného předmětu. Nevýhodou této metody je požadavek na pohybující se předmět, případně na pohybující se optickou soustavu. Tuto nevýhodu řeší použití stereometrického vidění, které je založeno na snímání obrazů z dvou kamer, a následné rekonstrukci scény. Tomuto algoritmu je věnována největší část mé práce.

Proces stereometrie lze rozdělit na separátní úlohy. Začátkem celého procesu je vytvoření „kalibrace“. Jedná se o výpočet takzvané fundamentální matice, která je maticí prostorové deformace mezi dvěma body, které jsou navzájem totožné v levém a pravém obraze. Tohoto výsledku je využito v následném procesu rektifikace, který vytváří Epipolární linie v obraze tak, že korespondující pixely z levého snímku a pravého snímku jsou na stejné diagonále. Tento proces můžeme obejít v případě, že se rozhodneme další vyhodnocovací metody implementovat s vektorovou, prostorovou logikou. Finální částí stereometrie je výpočet disparity. Jedná se o nosnou informaci vzdálenosti, která je přímo úměrná posunu mezi korespondujícími body v obrazech. Výpočet je založen na porovnávání oblastí, případně informace mezi pixely, u kterých předpokládáme, že by mohla nastat požadovaná korelace. Jedná se o nalezení optimální, minimální, hodnoty neboli maximální schody. Různé metody tohoto porovnání jsou popsány a implementovány v grafickém programovacím prostředí LabVIEW, prostředkem pro realizaci a implementaci úloh.

1 Teorie obrazu

Při zachycení reality objektivem fotoaparátu či kamery dochází k projekci scény do roviny. Digitalizovaný obraz tak postrádá informace o hloubce scény. Hloubka scény již ale nezachycuje skutečný tvar předmětu, ale pouze projekci jeho viditelných bodů (z pohledu kamery / lidského oka) do třetího rozměru.

Ztráta informace vyplývá z principu zisku obrazového signálu nad prostory signálu. Předpokládejme, že svět je definovaný nad jistou podmnožinou ω , která je v našem případě množinou euklidovského prostoru R^3 . Následný proces vzorkování a kvantování signálu, jenž je prováděn v kamerových čípech, vykonává transformaci $\omega \rightarrow \sigma$. Toto zobrazení je klíčovým faktorem při výpočtu stereometrického vidění.

Při následném zpracování takto získaných signálů, kde podprostor σ náleží R^2 , předpokládáme linearitu nově vzniklého prostoru, a tedy platí princip superpozice. Zároveň, jelikož signálová informace již prošla procesem vzorkování a kvantování, víme že σ je množinou Q bodů, a každému bodu jsme schopni přiřadit jeho index q . Tento systém by znamenal uložení informace o dvourozměrném prostoru do jednorozměrného pole, tedy by se jednotlivé řádky obrazu nacházely za sebou. Alternativním přístupem by bylo nahrazení množiny Q za množiny M a N .

$$f(m, n) = \omega(x, y, z) \rightarrow \sigma(m, n) \quad (1)$$

Pro následné zobecnění vztahu uvažujme ještě množinu $\{\varphi_k(m)\}$, jenž je množinou lineárně nezávislých prvků. Tuto množinu nazýváme bází prostoru, právě když libovolný prvek z prostoru σ můžeme vyjádřit jako lineární kombinaci bázevých proměnných.

$$f(m, n) = \sum_k \sum_l Q(k, l) \varphi_{k,l}(m, n) \quad (2)$$

Výše uvedený vztah se dá nejlépe představit při použití bázevých proměnných ve formě Dirakovy delta funkce. $\delta(m, n) = \begin{cases} +\infty & \text{pro } m = 0, n = 0 \\ 0 & \text{jinak} \end{cases}$. V takovém případě lze jednoduše určit příslušnou hodnotu pixelu v obraze na souřadnicích (m, n) , jako násobení patřičné hodnoty získané z měřicího systému a plochy Dirakovy delta funkce, jenž je rovna 1.

Pro následné zpracovávání obrazu je ještě nutné uvést, že každá operace nad obrazovou funkcí vytváří novou obrazovou funkci. Matematicky toto zapíšeme jako $g(m, n) = O\{f(m, n)\}$. Tato operace znamená že aplikujeme operátor O na obraz. Z teorie signálů dále vyplývá, že abychom byli schopni matematicky zjednodušit problematiku, uvažujeme pouze takové operátory, které jsou lineární, a zároveň invariantní vůči posunu. To lze zapsat následovně.

$$O\{a * f_1(m, n) + b * f_2(m, n)\} = a * O\{f_1(m, n)\} + b * O\{f_2(m, n)\} \quad (3)$$

$$O\{f(m - a, n - b)\} = g(m - a, n - b) \quad (4)$$

Typickým příkladem a zároveň nejpoužívanějším operátorem při zpracování obrazu je takzvaná konvoluce. Jedná se o operaci mezi dvěma funkcemi, kde zpracováváme námi zadanou funkci (obrazovou funkci) spolu s takzvaným konvolučním jádrem. Při zpracování obrazu, kde pracujeme s diskrétními veličinami a funkcemi se této funkci taktéž říká konvoluční maska, nebo kernelova maska. Operace provádíme podle následujícího vztahu.

$$f_{conv}(m, n) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(a, b) * \delta(a - x, b - y) \quad (5)$$

Tato operace je při zpracování obrazu důležitá, díky odvození vyplývajícího z dosazení do Fourierovy transformace. Dalo by se dokázat, že operace násobení ve frekvenční oblasti, se po aplikaci zpětné Fourierovy transformace stává konvolučním operátorem, nad již reálnými, případně diskrétními signály. Díky tomu je tedy konvoluce aplikací filtrů ve frekvenční oblasti, za pomoci aplikace konvoluční masky.

1.1 Reprezentace signálů v obraze a jeho základní charakteristiky

Dle odvození výše pohlížíme tedy na obraz jako na dvojrozměrné pole, které je složeno z součiny naměřených hodnot a příslušných bázeových proměnných. Takto získaný obraz nazýváme digitální obraz. Jedná se o speciální formu obrazu, který je na rozdíl od reálného světa sestaven z jedniček a nul (binární soustavy). V následujících kapitolách se budeme zabývat pouze obrazy rastrovými. Vektorové obrazy nejsou z pravidla pro strojové vidění a vyhodnocování obrazu vhodné.

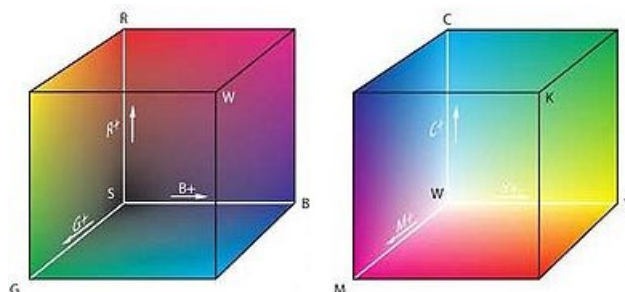
1.1.1 Barevný model

Informace o barvě pixelu není zcela jednoduchá, obvykle je reprezentována jako bod tzv. barevného prostoru. Barevný prostor je více rozměrný, zpravidla tří. V specifických případech i čtyřrozměrný, kde klasické barvy jsou doplněny například o transparentnost. Charakteristiku barvy jednoho pixelu poté reprezentuje trojice nebo čtveřice hodnot. Opakem těchto modelů, je model černobílý, který je složen pouze z intenzit jasů v rozsahu 0-256.

Barevné modely

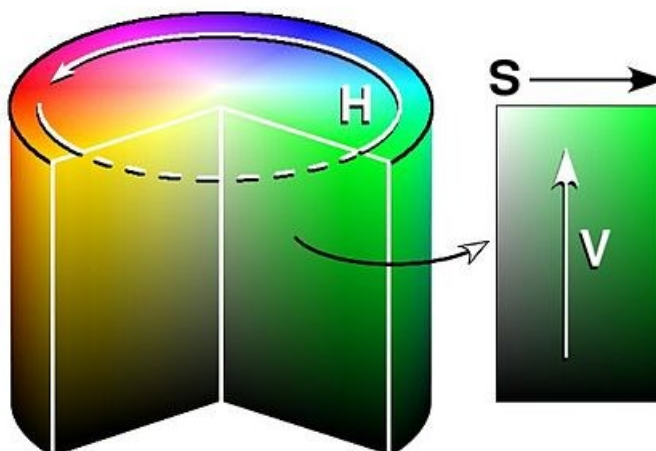
- RGB – Barvu pixelu reprezentuje trojice čísel odpovídající jasu červené (R), zelené (G) a modré (B) barvy. Výsledná barva je dána součtem intenzit jednotlivých barevných složek.

- CMYK – Výsledná barva pixelu je dána rozdílem složky azurové (C), fialové (M) a žluté (Y). Protože barevný model CMYK se obvykle používá při tisku, používá se kvůli úspoře barvy ještě informace o černé složce (K). [1]



Obrázek 1: reprezentace modelu RGB v levo a CMYK v pravo [1]

- HSV – Výsledná barva je dána složkami Hue, Saturation, Value. V dílčím provedení se jedná o Barevný tón, neboli odstín barvy, saturaci – sytost a hodnotu jasu. Alternativou vůči tomuto zobrazení je zobrazení HSB, které nahrazuje složkou Value za složku Brightness. V modelovém provedení se jedná o projekci do válce, kde obvod válce tvoří dílčí frekvenční složky barev (vlnové délky) a v ploše válce dochází k zobrazení intenzity barvy. [1]



Obrázek 2: Reprezentace modelu HSV [1]

1.1.2 Jas a hloubka obrazu

Jas pixelu je údaj odpovídající svítivosti plochy reálného obrazu, která se promítla do příslušného pixelu $f(m,n)$. Černá barva, tedy „nulová svítivost“, je obvykle v paměti počítače reprezentována číslem 0, úplně bílá je pak nejvyšším použitelným číslem (pro černobílý obrázek $U8 = 255$). Tuto

logiku lze samozřejmě zaměnit v závislosti na preferencích výpočtu (logika je taktéž rozdílná při použití barevných modelů a jas je nutné přepočítat).

Nejvyšší použitelná hodnota jasu vypovídá o schopnosti dané reprezentace obrazu v paměti počítače rozlišit různé úrovně jasu. Hodnota jí odpovídající se nazývá bitová hloubka obrazu. Obvykle se neudává vlastní číslo, ale počet bitů, které zabere v paměti číslo charakterizující jas jednoho pixelu.

Bitová hloubka	Maximální jas	Komentář
1	2 (2^1)	Jen černá a bílá
2	4 (2^2)	
4	16 (2^4)	
8	256 (2^8)	Běžné použití
24	16 777 216 (2^{24})	Tzv. True Color

Typická reprezentace v prostředí openCV je reprezentace černobílého obrázku pomocí datového typu unsigned integer délky 8 bitů, a pro barevný obrázek se může jednat o reprezentaci jako 3x integeru pro jeden pixel, nebo použití 32 bitového prostoru pro seskládání informací za sebe.

Paměť počítače není neomezená, proto i digitální obraz je jen omezeným výsekem. Prakticky výlučně se používá obdélníkový výřez, tedy vlastně matice, jejíž prvky jsou hodnoty jasu jednotlivých pixelů. Rozlišení se udává jako šířka a výška obrazu vyjádřená v počtu pixelů, tedy např. údaj 640×480 znamená, že obraz je široký 640 a vysoký 480 pixelů. [1]

2 Vývojová prostředí používaná pro analýzu obrazu

Pro počítačové vidění, strojové zpracování obrazu za účelem nalezení výsledku, jenž by odpovídal námi definovaným předpokladům, se v dnešní době využívá mnoho programů. Jedná se o matematicky orientované programy, jako je například Matlab, nebo o toolkity do programovacích jazyků jako je OpenCV pro programovací jazyk C případně C++, či knihovnu Vision Toolkit pro LabVIEW.

2.1 Matlab

Program používaný po celém světě k matematické analýze a k matematickému návrhu systémů případně komponent celých systémů. Jedná se o zjednodušený programovací jazyk založený na bázi skriptování, které je uživatelsky přívětivé. Program se liší od klasických programovacích jazyků nepožaduje syntaxi nižších tříd, a volá moduly, jež jsou již vytvořeny vývojáři, a snižuje tedy požadavky na uživatele.

Pro analýzu obrazu v prostředí Matlab byl vytvořen Image processing toolbox, který v sobě obsahuje širokou paletu funkcí pro zpracování obrazu počínaje grafickými deformacemi, přes konvoluční filtraci až po rektifikaci obrazů. Samotní vývojáři ale doporučují pro praktické použití přenesení vývojových kódů na akcelerované CPU případně GPU pomocí jazyka C. [13]

2.2 OpenCV

OpenCV je opensource knihovna vytvořena takzvaně lidmi pro lidi, která v sobě obsahuje sadu funkcí, v případě C++ sadu tříd pro strojové vyhodnocení obrazů. Knihovna v verzi 3.4.0 obsahuje již více než 2500 optimalizovaných algoritmů. Ty mohou být použity na detekci předmětů v obraze, analýzu tváří, sledování 3D objektů v obraze případně sledování trajektorie pohybu ve videu (sekvenci obrazů v čase).

Knihovna je zároveň kompatibilní s Pythonem, Javou a Matlabem, v tom smyslu že obsahuje předkompilované funkce, které jsou volatelné z těchto programovacích prostředí. Knihovna je zároveň kompilovatelná do formy DLL, a tedy může být volána například i z programovacího prostředí LabVIEW při použití .NET rozhraní.

2.3 LabVIEW

Programovací a vývojové prostředí LabVIEW (z angl. Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench) čili „laboratorní pracoviště virtuálních přístrojů“, někdy též LV, je produktem americké firmy National Instruments, která je průkopníkem a největším výrobcem v oblasti virtuální instrumentace, technické disciplíny, která zažívá veliký rozvoj v oblasti vývoje, výzkumu, školství a průmyslu.

Prostředí LabVIEW, někdy nazývané též jako G-jazyk (tedy „grafický“ jazyk), je vhodné nejen k programování systémů pro měření a analýzu signálů, řízení a vizualizaci technologických procesů různé složitosti, ale také k programování složitých systémů, jako je třeba robot. S určitou nadsázkou lze říci, že prostředí LabVIEW nemá omezení své použitelnosti.

Hlavním cílem virtuální instrumentace je nahradit dočasně nebo i trvale prostorově, finančně a mnohdy i časově náročné využití technických prostředků (hardware) řešením virtuálním (zdánlivým) za přispění programových prostředků (software) a zejména pak grafickými a vizuálními prostředky a zprostředkovat tak uživateli maximální názornost. Toto řešení umožňuje rychlé navrhování nových aplikací i provádění změn v konfiguraci, což je u realizace skutečnými nástroji za pomoci reálných součástí často velice nákladné nebo přímo nemožné. [19]

3 Metody získání hloubky scény

Při rozčlenění metod pro získání hloubky scény se odrazíme od základních fyzikálních a fyziologických principů. Jedním ze základních přístupů k získání této informace je využití obdobné vlastnosti, jako má lidské oko. Jedná se o mechanismus stereopsie (binokulární vidění, při němž vzniká i prostorový vjem, stereoskopické vidění). Alternativou k tomuto jevu je využití čisté fyziky a mechaniky světla, kterou využívají především takzvané ToF Kamery (Time of flight).

- Fyzikální princip
 - Čas letu světla
- Fyziologický princip
 - Monokulární vodítka
 - Interpozice
 - Lineární perspektiva
 - Pohybová paralaxa
 - Gradient struktury
 - Binokulární vodítka
 - Konvergence
 - Disparita

V pojetí fyziologických principů se rozdělují prostorová vodítka na dva typy, a to Monokulární a Binokulární. Monokulární vodítka se projevují při sledování scény jednou kamerou, tedy například pohybová paralaxa je sledováním pohybujících se předmětů, kde v závislosti na změně lokace korespondujících bodů na obrázcích $f(m,n)$ a $g(m,n)$ pořízených v časech T_1 a T_2 a při známé rychlosti a trajektorii pohybu předmětu spolu s konstantní pozorovanou scénou, jsme schopni vypočítat vzdálenost předmětu. Tento jev je především používán při sledování nebeských těles.

Další možností využití monokulárních vodítek je případ triangulace. Princip triangulace závisí na výpočtu posunutí bodu v prostoru v závislosti na výšce. Běžně je tohoto dosaženo za pomoci laserové stopy, jenž je sledována kamerou pod prostorovým úhlem.

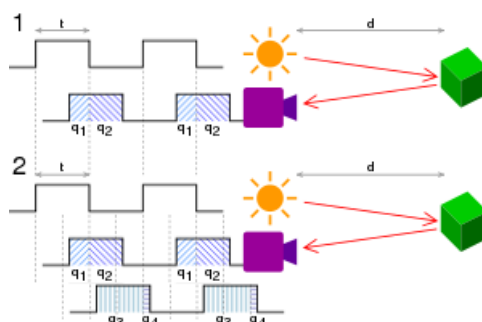
Zatímco monokulární principy využívají pouze jedné kamery, při binokulárním vidění využíváme dvou kamer, jež jsou umístěny v prostoru tak, aby zachycovaly stejnou scénu s určitým posunutím. Jedná se o principy stereopsie. Výsledná vzdálenost scény se pak dá určit v závislosti na posunu dvou bodů v prostoru.

3.1 Time of Flight kamery

Kamera s měřením délky letu (kamera ToF) je kamerový systém pro zobrazení vzdálenosti na základě známé rychlosti světla. Systém měří čas letu světelného signálu mezi zdrojem (fotoaparátem) a pozorovanou scénou, či subjektem pro každý bod obrazu (scéna je poté projekcí všech získaných bodů v prostoru). Tato kamera je součástí třídy LIDAR (Light Detection and Ranging) bez skeneru, v

níž je zachycena celá scéna s každým impulsem laseru nebo světelným impulzem. Na rozdíl od laserového pulzu jako v případě skenování systémů LIDAR.

Produkty ToF kamer pro civilní aplikace se začaly objevovat kolem roku 2000, protože procesy polovodičů se staly pro takové přístroje dostatečně rychlé. Systémy pokrývají rozsahy několika centimetrů až několik kilometrů. Rozlišení vzdálenosti je asi 1 cm. Boční rozlišení časových letových kamer je obecně nízké ve srovnání se standardními 2D videokamerou, přičemž většina komerčně dostupných zařízení má 320×240 pixelů nebo méně. Ve srovnání s metodami 3D laserového snímání pro zachycení 3D obrazů kamery TOF pracují velmi rychle a poskytují až 160 snímků za sekundu. [2]



Obrázek 3: Princip fungování ToF kamery [2]

Nejjednodušší verze ToF kamery využívá světelné impulsy nebo jediný světelný impuls. Osvětlení je zapnuto jen na velmi krátkou dobu. Výsledný světelný impulz osvětluje scénu a odráží objekty v zorném poli. Objektiv fotoaparátu shromažďuje odražené světlo a zobrazuje ho na snímacím nebo ohniskovém poli. V závislosti na vzdálenosti dochází ke zpoždění příchozího světla. Vzhledem k tomu, že světlo má rychlost přibližně $c = 300\,000\,000$ metrů za sekundu, je toto zpoždění velmi krátké: objekt se vzdáleností 2,5 m bude zpožďovat světlo o 16,6 ns. Ze stejného výpočtu taktéž zjistíme maximální pracovní vzdálenost kamery, která je většinou limitována maximální dobou prodlevy 50ns. Při této době je maximální pracovní vzdálenost 7,5m. Uvedený příklad výpočtu pro vzdálenost dva metry. [2]

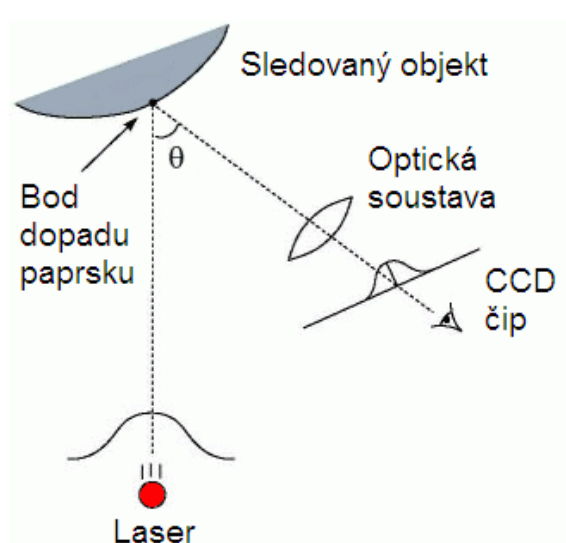
$$t_d = 2 \frac{D}{c} = 2 \frac{2,5}{300\,000\,000} = 16,66 \text{ ns}$$

Každý pixel snímače se skládá z prvku citlivého na světlo (např. fotodiody) a převádí přicházející světlo na proud. V analogových časovacích snímačích, připojených k fotodiodě, jsou rychlé spínače, které směřují proud k jednomu ze dvou (nebo několika) paměťových prvků (např. kondenzátoru). Ty působí jako součtové prvky. V počítačem řízeném digitálním časovacím obvodu je ke každému pixelu fotodetektoru přiřazen čítač času, který může být čítat hodinový signál o frekvenci několika GHz, a při návratu světla se zastaví čítání.

3.2 Triangulace

Nejpoužívanějšími zástupci triangulace jsou v dnešní době laserové a optické techniky. Tyto metody lze rozdělit do dvou skupin, a to na aktivní a pasivní triangulace.

Mluvíme-li o aktivních triangulacích, pak se jedná o systém s aktivním zdrojem záření, například laserovou stopou, a snímacím zařízením, CCD čipem. Komponenty tohoto systému jsou poté umístěny do triangulačního rozmístění (uvedeném na obrázku č.4). Vzdálenost světelného zdroje a snímacího prvku se nazývá triangulační báze, kde úhel mezi laserem a kamerou zůstává neměnný, zatímco úhel paprsku od předmětu odraženého a dopadajícího paprsku na předmět je závislý na výšce (vzdálenost) ve které se předmět nachází (závislý na reliéfu scény).



Obrázek 4: Triangulační systém

Pasivní triangulace je metoda, která na rozdíl od aktivní nevyužívá vlastního zdroje záření. Jedná se většinou o kombinaci několika snímacích zařízení, které zjišťují korespondence mezi jednotlivými body na dílčích obrazech. Tento systém je také označován za stereometrický systém a bude rozebrán dále.

3.3 Výběr metody

Dnes je na trhu dostupná velká škála metod schopna snímat fyzické objekty v trojrozměrném světě. Při výběru vhodné metody se musíme řídit potřebnými kritérii, kterými jsou například:

1. Účel použití naskenovaných dat (kontrola 3D tisku, modelování a design, ...)
2. Velikost objektu, který bude snímán
3. Skenování s texturou nebo bez (s barvou nebo bez)
4. Lokace měření
5. Maximální doba a podmínky pro nasnímání objektu (Objekt je v pohybu / není, ...)

Metoda	Velikost Objektu	Akt / Pas	Povrchová / Objemová	Vhodné vzdálenosti	Nejednoznačnost měření
Strukturované světlo	Mikroskopické po velmi malé	A	T	Triangulace	Je možná
Srovnání geometrických vzorů	Obvykle velké	P	T	Předloha	Žádná
Optická fázová interferometrie	Malé / mikroskopické	A	T	Rozdíl drah světla	Ano
Mapování čela vlny	Malé až velké povrchy	A i P	T	Rozdíl drah světla	Ne
Stereo snímání	Malé až velké scény	P	T	Nerovnosti / triangulace	Ne
Konfokální snímání	Mikroskopické až velmi malé	A	T		Ne
Moiré technika	Mikroskopické až velmi malé	A	T	Rozdíl drah světla	Ano
LIDAR	Velké	A	T	Rozdíl drah světla	Ano
Doba letu (ToF)	Velké	A	T	Rozdíl drah světla	Ano
Stínování	Typicky velké	A	T	Vlastnosti odrazivosti	Ne
Zaostřování	Typicky velké	P	T	Kvalita obrazu	Ne
Tomografie	Velké	A	V	Rekonstrukce	Ne
Laminografie	Velké	A	V	Rekonstrukce	Ne
Holografie	Malé až velké	A	T	Rozdíl drah světla	Ne
Konoskopická holografie	Malé až velké	A	T	Rozdíl drah světla	Ne
Atomární silová mikroskopie	Mikroskopické	A	T	Atomární síly	Ne
Tečková fotografie	Malé až velké	A	T	Změna dráhy světla	Ano
Tečková Interferometrie	Malé až velké	A	T	Změna dráhy světla	Ano
Optická koherentní tomografie	Malé	A	V	Změna dráhy světla	Ne

Dostupné z : [5]

3.4 Vymezení základních pojmů

- **Paralaxe** – Paralaxe je jedním ze základních principů, který byl v minulosti využíván k „měření“ vzdálenosti hvězd. Profesor Walter Lewin z MIT, autor knihy For the Love of Physics, popisuje tento jev pomocí zdviženého prstu na natažené ruce, a následném zavírání jednoho nebo druhého oka, kde v závislosti na pozadí dochází k posunu perspektivy. Tento pojem tedy označuje jako vzájemnou polohu dvou bodů vůči vztažné soustavě.

Pro využití paralaxe ve zpracování obrazu vycházíme z třetího Keplerova zákona (vztaženo na hvězdné systémy a dále zobecněno pro teorii obrazu), kde základem je zdánlivá dráha dvou korespondujících hvězd na obloze a vztah hmotnost – zářivost.

- **Bod v prostoru** – Jedná se o bod se souřadnicemi x, y (m, n), který vznikl transformací $\omega \rightarrow \sigma$. Pro následné zpracování je ovšem potřeba dodržet zákonitosti matematiky, a je vhodné provést ještě další transformaci z $R^2 \rightarrow R^3$, která je dána vztahem:

$$P(x, y) \rightarrow P(\theta, \gamma, \omega) \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta \\ \gamma \\ \omega \end{bmatrix} \quad (7)$$

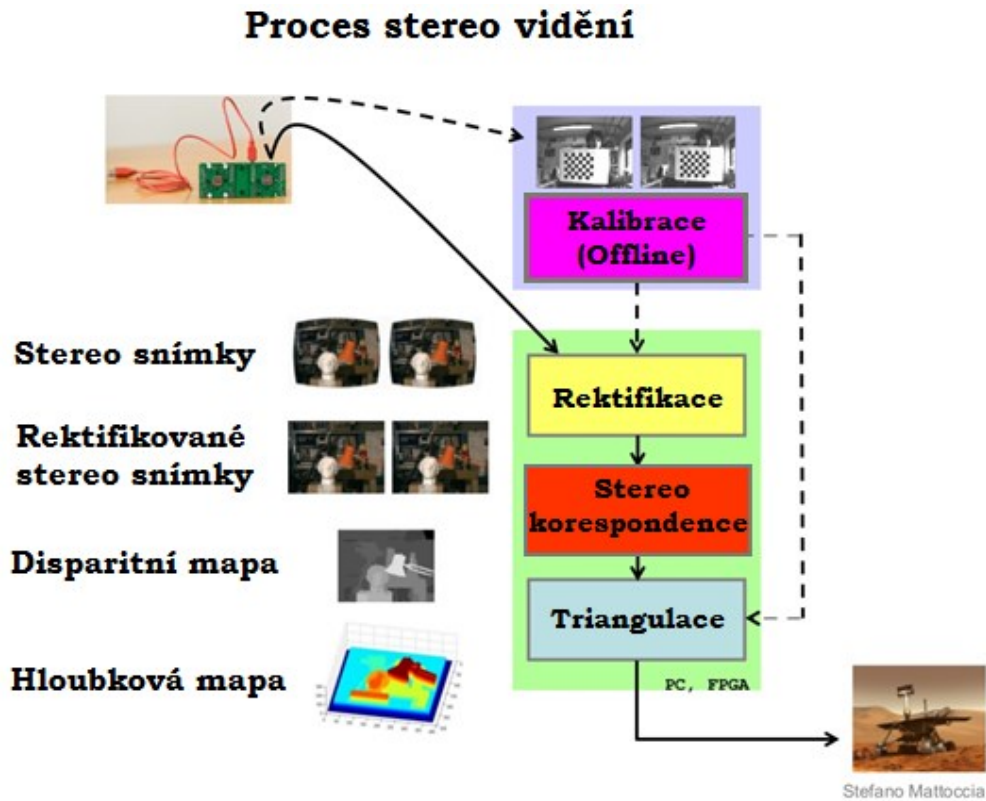
$$\begin{aligned} x &= \theta / \omega \\ y &= \gamma / \omega \end{aligned} \quad (8)$$

- **Korespondující body** – Jedná se o dva body, které jsou pořízeny z obrazů $f(m, n)$ a $g(m, n)$, a které zobrazují stejný bod v prostoru.
- **Rektifikace** - Pokud nebyly používány snímky získané z kamer v tzv. normálním ostavení¹, ale se sbíhajícími se optickými osami či v obecném, a nejsou dostupné stereo snímky, je možné je obdržet procesem rektifikace. Snímky pořízené kamerami v obecné poloze se transformují pomocí nalezení několika korespondujících bodů. Přesný matematický výpočet je popsán v příslušné kapitole.
- **Model scény** – Kromě hloubky scény lze snímáný prostor vyjádřit také modelem scény. Ten popisuje kromě hloubky i zbývající dvě prostorové souřadnice. Model scény je získán pomocí metod 3D rekonstrukce.

¹ Kamery s nulovým vzájemným úhlem

4 Stereometrie

Základ pro vytvoření trojrozměrného obrazu lze realizovat pomocí dvou 2D kamer, které budou daný objekt sledovat z dvou různých úhlů.



Obrázek 5: Blokové schéma procesu stereometrie [15]

Ze získaných obrazů lze určit paralaxu (zdánlivý rozdíl mezi pozicí pixelů pravé a levé scény), ze které je následně možno odvodit vzdálenost objektů. Objekty snímáné z blízka se vyznačují velkou paralaxou, oproti tomu vzdálenější objekty mají paralaxu malou. Nulovou paralaxou se vyznačují velmi vzdálené objekty (v nekonečnu).

Výpočtem paralaxy, tedy určení přesné vzdálenosti mezi pozicemi pixelů pravého a levého obrazu, je dosaženo tzv. disparity.

Disparita v základním smyslu vyjadřuje rozdíl. V případě stereo disparity se jedná o rozdíl mezi pozicemi stejného bodu na dvou různých snímcích stejné scény – levého a pravého snímku. Čím blíže je objekt ke kameře, tím větší je jeho "skok" mezi snímky. To umožňuje převést hodnotu disparity například na odstíny šedi – čím větší disparita, tím větší hodnota. V konečném důsledku tak jsou objekty blíže ke kameře světlejší. Mapa disparity tak nabízí určitý druh informace o hloubce ve scéně (při známých parametrech kamer je možné hloubku vypočítat přesně). Problém samozřejmě představují oblasti, o kterých máme informaci jen z jediného snímku. Tyto oblasti

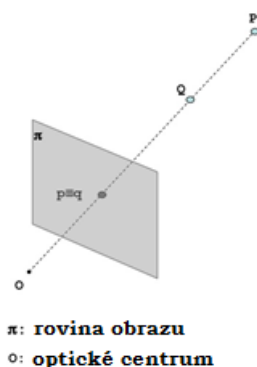
jsou například na levé straně levého snímku, nebo na "hranách" mezi blízkými a vzdálenými objekty. V těchto oblastech vznikají nespojitosti v mapě disparity v důsledku nedostatku informace.

Disparitu je možno rozdělit na vertikální, kdy jsou osy kamer k sobě rovnoběžné (paralaxa je téměř nulová) a tedy pro trojrozměrné zobrazení nežádoucí, a na horizontální, která je díky své nenulové paralaxe využívána k 3D vizualizaci.

Porovnávat je možné hranové obrazy, texturní charakteristiky, šedotónové nebo barevné obrazy. Možná je i kombinace více příznaků. Čím lépe zvolené charakteristiky, tím lepší je výsledek. Vhodné je také omezit hledání podobného bodu, na určitou vzdálenost a penalizovat podobné body ve velké vzdálenosti. Důležitým parametrem je i velikost okna, které se porovnává.

4.1 Zjednodušený matematický model

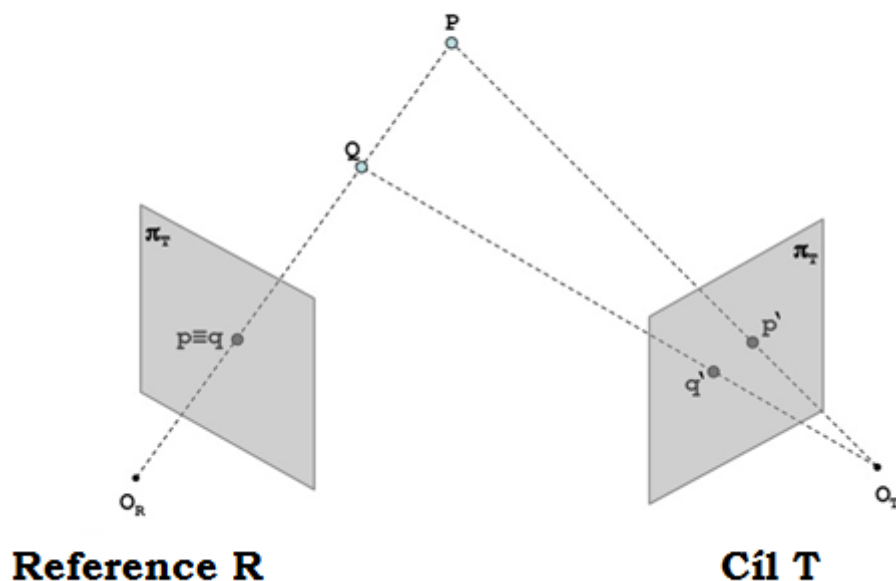
Pro vyjádření matematického modelu stereometrie (dvou vzájemně spřažených kamer) je nutné nejdříve popsat základní principy a fungování optiky a projekce bodů. Na obrázku č.6 je demonstrováno použití jedné kamerové soustavy, která je složena z roviny obrazu, optického centra kamery a bodů v prostoru P a Q.



Obrázek 6: Projekce obrazu při použití jedné kamery

Při použití jedné kamery se tedy dva body umístěné v prostoru tak, že spojnice vzdálenějšího z bodů spolu s optickým středem kamery prochází bodem bližším promítají do výsledného obrazu jako jeden totožný bod, a zobrazení tvoří optické iluze. V případě stereometrie je řešením použití dvou kamer, které jsou vzájemně posunuty v prostoru. Obrázek 7 zachycuje stejnou situaci doplněnou o další kameru. V případě referenčního obrazu je stále bod P shodný s bodem Q, ale jejich diference je již promítnuta na rovině obrazu T.

Stereo kamera

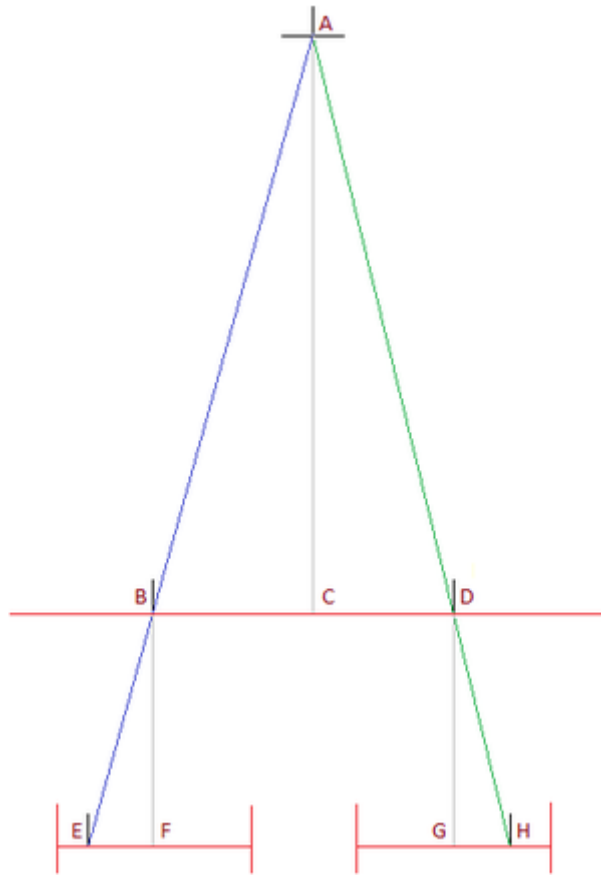


Obrázek 7: Použití 2 kamer pro zachycení bodu v prostoru [17]

Pro zjednodušení výpočtu předpokládejme, že optické roviny R a T jsou množiny, jejichž všechny prvky náležejí množině δ ; $\delta \in R^2$. Množinou δ zároveň vedeme kolmý řez k ose X, tak aby řez procházel množinami R i T a zároveň předsunutý řez X_r , jenž je rovnoběžný s řezem na ose X. Na takto vzniklé přímce definujeme tři body.

$$\begin{aligned} B &\in \overrightarrow{PQ_r} \cap X_r \\ D &\in \overrightarrow{PQ_t} \cap X_r \\ C: |BC| &= |CD| \end{aligned} \tag{9}$$

Pro zjednodušení výpočtu předpokládejme pouze jeden bod v prostoru: $A = P$. Po doplnění optických průmětů do takto vzniklého obrazu, dostáváme body E a H jenž jsou přenesením přímky AB, respektive AD na optické roviny P a Q. Výsledná situace je zobrazena na Obrázek 8.



Obrázek 8: Přenesení stereometrie do 2D roviny vidění (zjednodušený přístup)

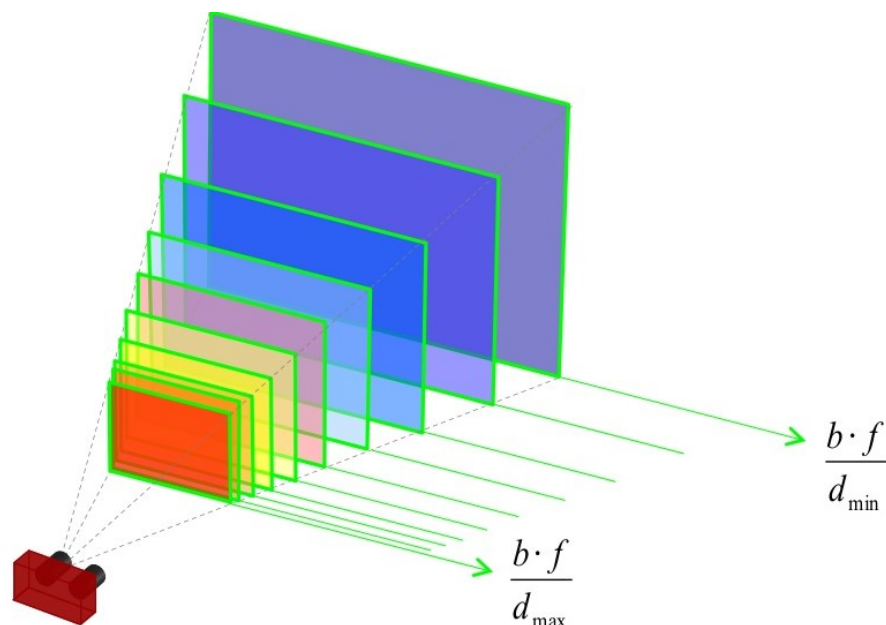
V takto vytvořeném systému stereo vidění je vzdálenost mezi optickými středy kamer rovna velikosti úsečky $|BD| = |BC| + |CD|$ a zároveň platí, že trojúhelník ACB je totožný s trojúhelníkem BFE a trojúhelník ACD s trojúhelníkem DGH. Rozdíl mezi pixely lze tedy vypočítat:

$$\begin{aligned}
 d &= |EF| + |GH| \\
 d &= |BF| \left(\frac{|EF|}{|BF|} + \frac{|GH|}{|DG|} \right) \\
 d &= |BF| \left(\frac{|BC| + |CD|}{AC} \right) \\
 d &= \frac{|BF| |BD|}{AC} = \frac{k}{z}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Za takto stanovených předpokladů můžeme tedy říct, že disparita $d = k/z$, kde k je vzdálenost mezi kamerami vynásobena vzdáleností čočky od senzoru a z = vzdálenost mezi čočkou a bodem jenž pozorujeme.

Jelikož výpočet disparity je založen na předpokladu rovin umístěných tak, že obě náleží stejnému R2 souřadnicovému prostoru, je nutné před samotným zpracováním provést proces rektifikace. Jedná se o proces bipolární geometrie, který přetransformuje získanou matici do jiného úhlu pohledu.

Při předpokladu že tedy máme jehlan kamerového vidění s hranou b a ohniskovou vzdáleností f je systém popsán disparitou d [d_{\min} , d_{\max}]. Tento jehlan je rozdělitelný na takzvané „disparity planes“ pro jednotlivé úrovně disparity (přesnost systému měření).



Obrázek 9: Zobrazení úrovní disparity [18]

4.2 Výpočet disparity

Jak již bylo odvozeno na zjednodušeném matematickém modelu, výpočet disparity je závislý na vzájemném úhlu kamer, a také na míře posunutí v pozorované ose, tedy na paralaxe. V klasické stereometrii se dá zjistit vzájemného úhlu kamer pomocí procesu kalibrace, a výsledná paralaxe, disparita, se dále stanoví na základě podobností dvou pixelů.

4.2.1 Stochastický přístup k obrazu

Před samotným rozбором problematiky nalezení dvou podobných pixelů, se podívejme na stochastický přístup k obrazu. V následující kapitole uvedu základní poznatky statistiky aplikované na obrazový signál.

Stejně jako libovolná získaná informace, je taktéž každý pixel v obraze zatížen určitou nejistotou. Ze statistiky můžeme tuto nejistotu definovat tak, že existuje „jev A = změřená hodnota pro jeden pixel v obraze“. Při aplikaci této definice na celou plochu obrazu, o velikosti M, N pixelů, získáme náhodné pole.

Jelikož náhodná veličina je měřitelná, můžeme si dále představit situaci, kde z kamery pořídíme třicet a více snímků (předpoklad pro statistickou analýzu klasickými metodami vyplývá z minimálního rozsahu statistického souboru) z jedné kamery, která staticky sleduje náhodnou scénu. Kdybychom tímto způsobem naměřili teoretické nespočetno hodnot, normalizovali je a vynesli je do grafu, získáme takzvané rozložení pravděpodobnosti. Rozložení pravděpodobnosti náhodné veličiny je pravidlo, kterým každému náhodnému jevu popisovaného touto veličinou přiřazuje určitou pravděpodobnost. [10]

$$\sum_x P[A = x] = 1 \quad (11)$$

Nyní již můžeme definovat základní míru polohy náhodné veličiny, kterou je střední hodnota. Jedná se o parametr rozdělení náhodné veličiny, definovaný jako vážený průměr daného rozdělení. V řeči teorie míry se jedná o hodnotu, kde P je pravděpodobnostní míra určující dané rozdělení náhodné veličiny A .

$$\mu_f = \int_{-\infty}^{\infty} P(x)dx = E X \quad (12)$$

Kromě toho, že se v praxi omezujeme na sdružené pravděpodobnosti druhého řádu, zavádíme obvykle ještě další zjednodušující předpoklady. Často se předpokládá homogenita a ergodicita náhodného pole. Náhodné pole můžeme považovat za homogenní, jestli že jeho střední hodnota není závislá. Následný vzorec vyplývá z odvození autokorelační funkce při použití těchto zjednodušujících pravidel. [10]

$$\begin{aligned} E X &= \{(f(m, n) - \mu_{f(m, n)}), (g(m, n) - \mu_{g(m, n)})\} \\ &= E \{f(m, n) - \mu_{f(m, n)}\} - E \{g(m, n) - \mu_{g(m, n)}\} \end{aligned} \quad (13)$$

Jelikož střední hodnota je lineární invariantní operátor, jsme schopni upravit vztah do jeho finální podoby. Výsledek této střední hodnoty se nazývá korelace. Tato veličina určuje míru závislosti náhodné veličiny $f(m, n)$ vůči náhodné veličině $g(m, n)$. V případě že je výsledná hodnota blízká nule, jedná se o vzájemně nesouvisející náhodné veličiny. V případě že je korelace větší než nula, jedná se o pozitivně závislé veličiny, a opačně. [10]

4.2.2 Výpočet míry podobnosti

Nyní když jsme již definovali vše potřebné, můžeme se zaměřit na výpočet míry podobnosti mezi dvěma pixely ve dvou obrazech stereometrického páru. Při výpočtu této veličiny se zabýváme výpočtem takzvané cenové (cost) funkce. Tato cenová funkce je dále využívána algoritmy pro vyhodnocení finální disparity.

Výsledkem cenové funkce je projekce okolního prostoru námi zvoleného bodu $f(m,n)$ do prostoru $g(m,n)$ s výsledkem jež přímo úměrně odpovídá míře korelace mezi těmito náhodnými veličinami.

- **Suma absolutních rozdílů (SAD)** – jedná se o nejčastěji používanou metodu pro výpočet cenové funkce. Jde o sečtení rozdílů jasů v černobílém, případně dílčích složek barevného obrazu nad pixely určitého okna. Velikost prohledávaného pole je definována rozměry a, b a posunutím v disparitním směru symbolem d .

$$c(m, n, d) = \sum_{a_{max}} \sum_{b_{max}} f(m - a, n - b) - g(m - a + d, n - b) \quad (14)$$

- **Suma diferencí konvoluční masky** - Jedná se o rozšiřující metodu SAD, která na rozdíl od své předchůdkyně implementuje operátor lineární konvoluce. Konvoluci můžeme v tomto smyslu vnímat jako aplikaci váhových funkcí nad dílčími pixely ze zvoleného okna. Pro aplikaci této operace zavádíme novou obrazovou funkci $j(a,b)$. Výsledek zároveň můžeme normovat přes velikost naší konvoluční masky.

$$c(m, n, d) = \frac{1}{a_{max} b_{max}} \sum_{a_{max}} \sum_{b_{max}} (f(m - a, n - b) - g(m - a + d, n - b)) j(a, b) \quad (15)$$

V praxi se může jednat o konvoluční masky například logaritmického filtru nebo Gaussova normálního rozdělení. Odvození těchto konvolučních masek je velmi jednoduché ve frekvenčním spektru, a aplikací zpětné Fourierovy transformace.

- **SSIM podobnost dvou obrazů** – Výpočet je založen na kontrastu, jasů a struktuře dvou pixelů. Výsledek je intervalu $<-1, 1>$ kde 1 vyjadřuje úplnou shodu obrazů. Výsledný index je multiplikace všech těchto členů.

$$c(m, n) = [I(m, n)]^\alpha [k(m, n)]^\beta [s(m, n)]^\gamma \quad (16)$$

Kde $I(m,n)$ je jasová složka pixelů, $k(m,n)$ je hodnota kontrastu a $s(m,n)$ je informace o struktuře pixelu. Obvykle se ale index počítá jen vůči jasové složce. [7]

4.2.3 Určení finální optimální disparity

Finální disparita je definována jako nalezení globálního minima z cenové funkce, tedy jako nalezení maximální možné korelace mezi body $f(m,n)$ a $g(m+x, n+y)$. Na základě toho, jestli uvažujeme hledání v celém obraze nebo v pouze v okolí původního bodu se jedná o metody globální nebo lokální.

Lokální metody: Jedná se o metody pro výpočet disparity na základě pravidla winner-takes-all, tedy že nalezení minima odpovídá výsledné disparitě. Pro nalezení výsledku se již nevyužívají ostatní výsledky. Jedná se o aplikaci matematického pravidla:

$$d = \min\{c(d)\}$$

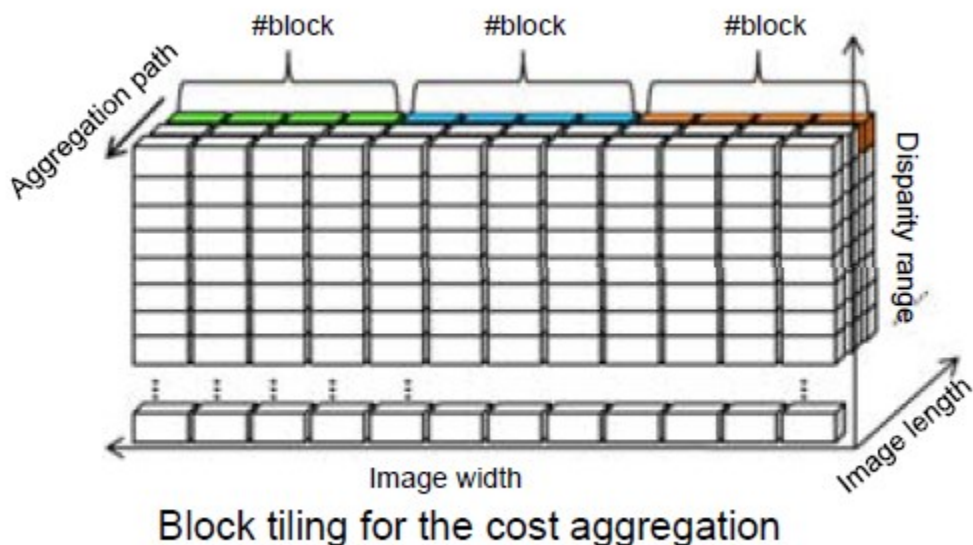
Globální metody: Globální metody neuvažují vlastnosti pouze jednoho pixelu případně oblasti, ale i okolí ostatních bodů potažmo celého obrazu. Taktéž zohledňují to, že jas se v blízkém okolí příliš nemění, a eliminuje tím šum vzniklý v obraze, a jsou tak méně náchylné k chybám.

Semiglobální metody: Metody kombinující vlastnosti globálních i lokálních metod. Výhodou těchto metod je především poměr rychlosti a přesnosti. Metody jsou založené na minimalizaci energetické funkce.

4.2.4 Semi Global Matching

Tato metoda se snaží najít shody pro každý pixel v obrázku, pomocí známé polohy kamer vůči objektu, který se snažíme rekonstruovat ve 3D. Výhodou této metody je především poměr rychlosti zpracování a přesnosti, takže je velmi vhodná pro praktické využití. Je velmi efektivní, co se týče vyhledávání krajů a rohů objektu, relativně citlivá na objekty s proměnlivou plochou a zároveň poměrně jednoduše aplikovatelná co se týče volby parametrů díky své přizpůsobivosti.

Základní myšlenka pro aplikaci této metody je porovnávání bloků (oken) v okolí pixelů, pro které se snažíme vypočítat shodu a tím získat přehled o vzdálenosti objektu a jeho plochy od kamer, ze kterých jsou pořízeny jednotlivé obrazy.



Obrázek 10: Příklad rozdělení obrazu podle block matchingu [26]

Běžný problém ve stereometrii je neznámost základních parametrů snímaného prostředí, jako je například světlo, odrazy apod. Těmto problémům, jejichž vliv silně ovlivňuje výsledné zpracování obrazů se dá však vyhnout, a to vytvořením relativně standardizovaného prostředí ve kterém dochází k pořízení obrazů, a to kalibrací kamer, regulací osvětlení, převedením obrazů do obrazů ve stupních šedi a ve krajních případech i softwarovou úpravou obrazů.

Původní implementace metody SGM (Dr. Heiko Hirschmüller, 2005) používala metodu Mutual Information (dále již MI) jako porovnání ceny. Metoda byla již předtím využívána pro různé aplikace, například v medicíně ve formě snímání obrazů z různých senzorů a následném sestrojení histogramu obsahujícím informace o globálních radiometrických rozdílech na daném bloku (okně) pixelů z obrazu pořízeného pomocí senzorů. Na základě předchozích úspěchů metody MI byla tímto aplikována pro SGM ve stereometrii, hlavní předností byla schopnost porovnávat nerektilizované obrazy, díky možnosti jednotlivé bloky (okna) vůči sobě natáčet a škálovat, jelikož se jedná pouze o porovnávání jednotlivých pixelů. [11]

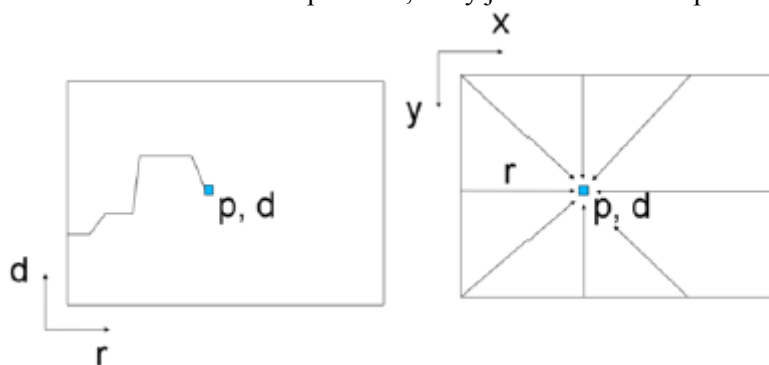
Další studie následně ukázaly, že metoda MI je schopná modelovat všechny globální radiometrické rozdíly velmi dobře, ale není dostačující, co se týče lokálních radiometrických rozdílů způsobených jinou škálou barev, stíny. Taktéž není vhodná při snaze zvýšit škálu radiometrické hloubky (např. 16 bit kvantizace narozdíl 8 bit na pixel), jelikož histogram začne být příliš rozptýlený.

Pathwise aggregation.

Metoda Semi global matching využívá mírně rozdílný přístup k určení disparity v obraze. Jedná se o proces nazvaný pathwise aggregation, který optimalizuje rovnici uvedenou níže. [11]

$$E(D) = \sum_p \left(C(p, D_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|D_p - D_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|D_p - D_q| > 1] \right) \quad (17)$$

Po optimalizaci rovnice dostaneme algoritmus, který je lineární v čase, a tedy celková doba výpočtu disparity mapy je závislá od počtu pixelů v obraze a zvolených úrovní disparity. Nicméně optimalizace je provedena na úrovni R1 rozměrného prostoru (takzvané scanlines – prohledávání pixel matching v řadě) na rozdíl od klasického R2 prostoru, který je ovšem NP complete.²



Obrázek 11: Zobrazení osmi optimalizačních cest k každému pixelu [11]

Jak je zobrazeno na Obrázek 11 ke každému obrázku je nalezeno 8 základních scanline, na kterých je vypočtena dílčí cena pro každou úroveň disparity. Ceny jednotlivých cest jsou následně

² NP complete – Nondeterministic polynomial Compleť : Problematika P vs NP problému tisíciletí, která říká že NP problém je takový, u kterého nejsme schopni stanovit časový polynom s konečným počtem členů. NP complet je podmnožina největší komplexity.

sečteny pro každý pixel, a je vybrána nejnižší úroveň disparity, která je vyhodnocena jako výsledná disparita pixelu.

Výhoda je v potlačení malých rozdílů v disparitě pomocí uvedené rovnice, která je často způsobená malými změnami mírně nahnuté ploše místo opravdových nespojitostí (jako je díra, hrana objektu apod.)

4.3 Epipolární geometrie a rektifikace obrazu

Epipolární geometrie a rektifikace obrazu, který je produktem matematických projekcí v prostoru, je základním stavebním kamenem pro řadu disciplín při zpracování obrazu. Celkový problém je podrobněji popsán v knize profesora Rich Radkeho, Computer Vision for Visual Effects. Jedná se o problémy s pohyblivou kamerou a obrazy v čase t a $t-1$, zpracování dvou nezávislých obrazů nebo vyhodnocení pohybu předmětů.

Jak již bylo zmíněno v základním matematickém rozboru projekce 3D scény do dvou planárních rovin obrazu, v našem případě se jednalo o optické roviny R a T , jsme schopni provést rekonstrukci této projekce narovnáním planárních rovin obrazu do stejného R^2 prostoru.

4.3.1 Fundamentální matice

Při kvantifikaci takto vzniklého problému využíváme takzvané fundamentální matice, která je čtvercovou maticí s velikostí strany rovnou třem. Tato matice je rovněž využívána jako matice afinní transformace. Mezi afinní operace patří posunutí, otáčení, změna měřítka, zkosení a operace vzniklé jejich skládáním. Ve všech případech se jedná o lineární operace nad maticovým prostorem.

$$\begin{bmatrix} x' & y' & 1 \end{bmatrix} \bar{F} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (18)$$

Ze základního vzorce pro výpočet je tedy zřejmé, že máme-li bod definovaný funkcí $g(m,n)$, bude mít tento bod souřadnice x', y' . Pro bod $f(m,n)$ budou tyto souřadnice x, y spolu s danou váhou bodu.

Jelikož je F matice maticí pouze se sedmi stupni volnosti, existuje více metod, jak vypočítat koeficienty této matice. Pro praktické využití bylo využito výpočtu ekvivalentnímu afinní transformaci.

1. **Získání korespondujících bodů** – Pro výpočet této matice je potřeba vstupních dat ve formě korespondujících bodů. Jak již bylo zmíněno jedná se o matici s $N=7$ stupni volnosti, a je tedy potřeba použít aspoň čtyř korespondujících bodů v obrazech. Zároveň je potřeba tyto body statisticky normalizovat do podoby, kde jejich střední hodnota bude nula a výsledná střední odchylka jedna.
2. **Vytvoření soustavy rovnice v prostoru** - Pro každý bod v prostoru vyřešíme soustavu rovnic fundamentální matice. Uvedeme praktický příklad pro jeden pár korespondujících bodů.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} xF_{11} & yF_{12} & F_{13} \\ xF_{21} & yF_{22} & F_{23} \\ xF_{31} & yF_{32} & F_{33} \end{bmatrix} = 0 \quad (20)$$

$$x'F_{11}x + x'F_{12}y + x'F_{13} + y'F_{21}x + y'F_{22}y + y'F_{23} + xF_{31} + yF_{32} + F_{33} = 0 \quad (21)$$

Nyní ještě uvedeme výsledný vztah pro N párových bodů v maticovém tvaru.

$$\begin{bmatrix} x_1x'_1 & y_1x'_1 & x'_1 & x_1y'_1 & y_1y'_1 & y'_1 & x_1 & y_1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_Nx'_N & y_Nx'_N & x'_N & x_Ny'_N & y_Ny'_N & y'_N & x_N & y_N & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{12} \\ F_{13} \\ F_{21} \\ F_{22} \\ F_{23} \\ F_{31} \\ F_{32} \\ F_{33} \end{bmatrix} = 0 \quad (22)$$

3. **Vyřešení lineárního systému z bodu 2.** – Pomocí algoritmu SVD (singular value decomposition) vyřešíme tento lineární systém na bázi vztahu:

$$\bar{A} = \bar{U} \bar{D} \bar{V}^T$$

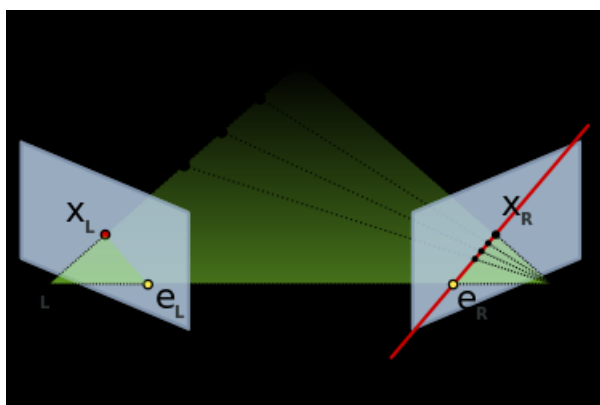
Kompletní popis problému můžeme nalézt v knize Přehled užití matematiky [24].

Po vyřešení této rovnice můžeme F nalézt jako poslední sloupec matice V a provést transformaci na 3x3 matici.

4. **Normalizace a přepočítání systému** – V posledním kroku normalizujeme matici F a následně znova přepočítáme SVD pro získání optimálního výsledku. Toto je žádoucí z důvodu menšího stupně volnosti matice F, než je její skutečná velikost.

4.3.2 Epipolární linie

Před samotným odvozením výpočtu Epipolární linie je nutné zmínit jeden zajímavý poznatek vycházející z matematické analýzy problému. V každém systému, v němž platí základní poznatky z akustiky a optiky, pro náš případ předpokládejme že tyto elementární fyzikální jevy jsou dodrženy, je možné najít bod souběhu všech epipolárních linií. Tento bod se nazývá optickým centrem. V případě dvou obrázků, jsme schopni najít dvě na sobě závislá optická centra, kterými budou procházet všechny Epipolární linie v závislosti na poloze referenčního bodu. Taktéž platí komutativní zákon a jsme schopni převést bod z levého referenčního obrazu do pravého a naopak.



Obrázek 12: Demonstrace epipolární linie

Nyní zavedeme substituci, kde výsledek maticové operace fundamentální matice s naším referenčním bodem nahradíme za vektor $[a,b,c]^T$, a dosadíme do referenčního vzorce.

$$\bar{F} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = 0 \quad (24)$$

$$ax' + by' + c = 0 \quad (25)$$

Výsledkem není nic jiného než rovnice přímky, s vypočtenými parametry a,b,c jenž jsou závislé pouze na fundamentální matici prostoru, a hodnotě referenčního bodu. Nyní ještě uveďme na pravou míru tvrzení, že každý bod z referenčního obrazu, musí mít Epipolární linii, která prochází optickým středem. Dosazením do předchozích vzorců dojdeme k závěru, že optický střed je vlastním vektorem matice F s λ hodnotou 0, a zároveň že vynásobením fundamentální matice libovolnou konstantní hodnotou, dostáváme ekvivalentní výsledek. Díky těmto vlastnostem je tedy fundamentální matice, jak již bylo zmíněno pouze se sedmi stupni volnosti.

5 Získané výsledky ToF / 3D kamery :

5.1 ToF kamera

Pro měření byla použita kamera ToF640 – 20gm dodávaná firmou Bassler. Jedná se o kameru s měřením doby letu, která má po obvodu objektivu umístěno celkem osm světelných emitorů, jež jsou následně sbírány po zpětném odrazu od předmětů v určité vzdálenosti do objektivu. Jedná se o kameru s GigE konektorem, která je ovládána z aplikace dodávané spolu s kamerou, aplikace je nazvaná ToF Viewer.



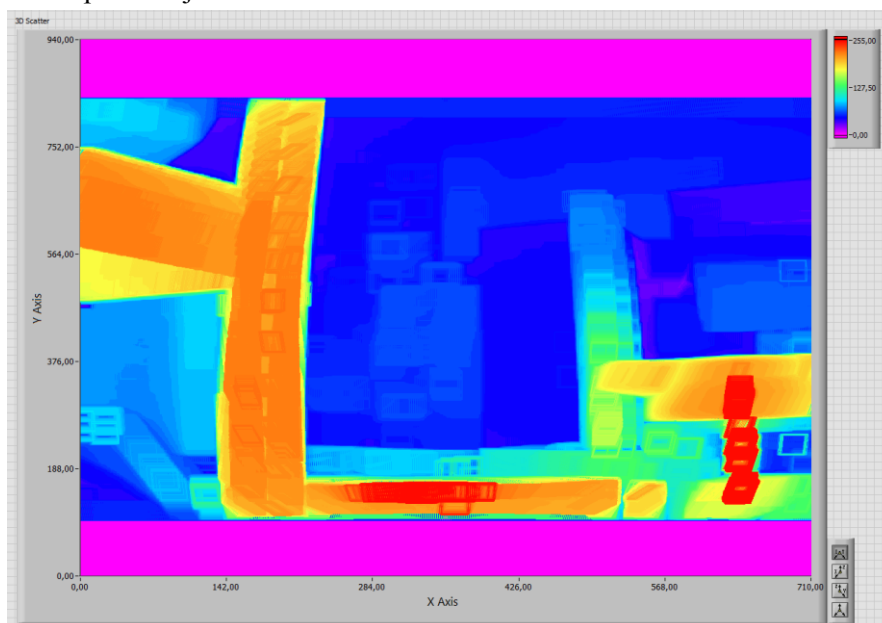
Obrázek 13: ToF640-20gm

Kamera má výrobcem definovanou vzdálenost použití mezi 0-13 metry, s maximální obnovovací frekvencí snímku 20 Hz. Při dosazení do vzorců ekvivalentních pro výpočet disparitních úrovní stereometrie, jsme schopni určit rozlišovací schopnost kamery jako podíl maximální možné vzdálenosti 1300 (cm) a maximální hloubky obrazu 255. Diference mezi dvěma hladinami je tedy výpočtem určena na 52 cm. Toto je ale relativní, protože jsme schopni vytvořit virtuální nulu, a posunout tak optickou vzdálenost jedné úrovně. Diference by pak byla dána jako maximální možná mezi dvěma hladinami mínus offset. Tento fakt je pravdivý pro použití 8 bitových hodnot.



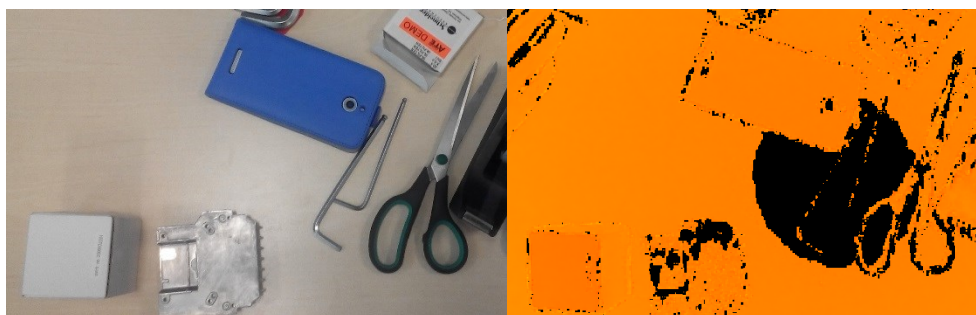
Obrázek 14: Získaná hloubková mapa při střední vzdálenosti pozorovaných předmětů 3 metry.

Pro získání referenčního snímku byla kamera umístěna do prostor místnosti, kde sledovala rozmístění předmětů v prostoru. Střední pracovní vzdálenost byla nastavena na tři metry. A výsledný obrázek byl přenesen do programovacího prostředí LabVIEW kde byla hloubková mapa vykreslena do 3D grafu, kde barva reprezentuje vzdálenost.



Obrázek 15: Zobrazení získaného obrazu do 3D grafu z čelního pohledu

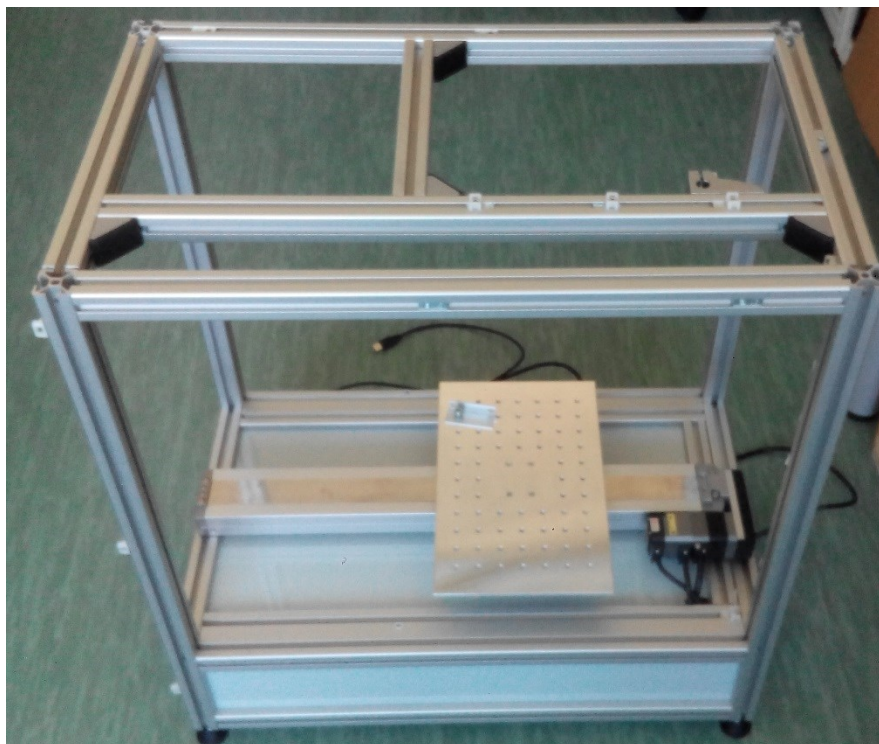
Následně byla kamera umístěna tak, aby její objektiv byl umístěn 70 centimetrů od sledovaných objektů a místo sledování místnosti byly využity standartní kancelářské potřeby. První pozorovaný jev, viditelný na získaném obraze je, že kamera obsahuje slepé místo. Jedná se o místo kde dopadající světlo není odraženo pod vyhovujícím úhlem zpátky do objektivu kamery, a tedy nemáme zaznamenanou žádnou informaci. V obraze je toto místo viditelné jako černé kolečko. Další patrný aspekt takto pořízeného obrazu je nedostatečné rozdělení jednotlivých hladin obrazu. Detekce objektů by sice stále byla možná, ale především díky faktu, že objekty obsahovaly hrany a světlo bylo od těchto hran odraženo mimo objektiv kamery, stejně jako v případě špatné ohniskové vzdálenosti. Nicméně klasifikace výšky předmětu by již nebyla možná.



Obrázek 16: Srovnání hloubkové mapy ToF kamery při střední vzdálenosti předmětů 70 cm

6 Algoritmus a výsledky Triangulace

Pro ověření algoritmů a výsledků triangulačních metody bylo použito konstrukce firmy ATEsystem s.r.o. sestavené z kamery, laseru a lineárního posunu. Pro triangulační metodu je tato sestava typická, protože vyžaduje, aby bylo zaznamenáno několik prostorových snímků, z kterých je dále vypočtena hloubková mapa.

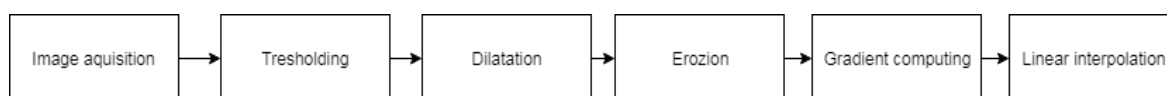


Obrázek 17: Použitá konstrukce k ověření algoritmů triangulace

6.1 Algoritmus výpočtu hloubkové mapy při triangulaci

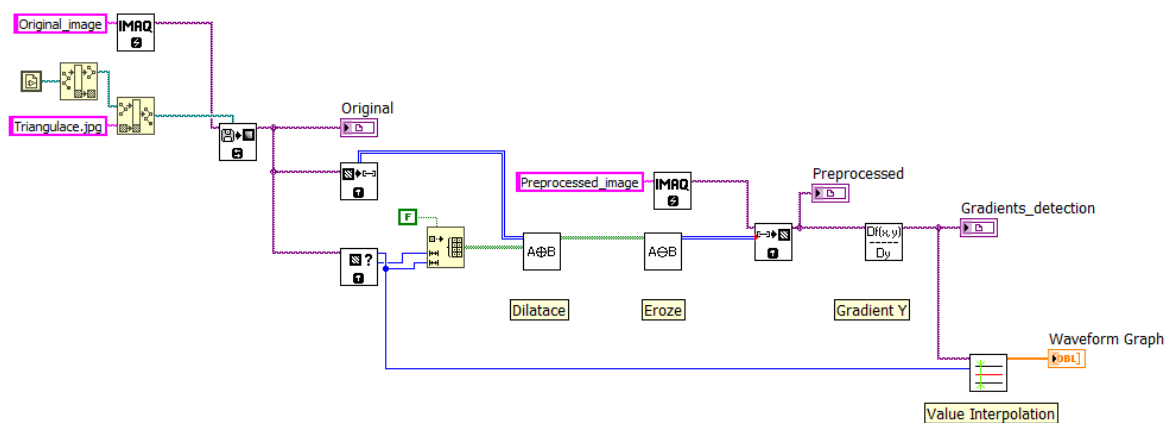
V následující kapitole je postupně uveden matematický postup výpočtu hloubkové mapy pro jeden obrázek, pořízený při provádění testu. Výsledný algoritmus je následně proveden na každém pořízeném obrázku, který je vždy sejmut v časovém úseku odpovídajícímu požadovanému posunu předmětu ve vodorovné ose.

Pro samotný postup výpočtu byl navržen algoritmus, jenž je popsán následujícím diagramem:



Obrázek 18: Diagram výpočtu hloubkové mapy triangulace

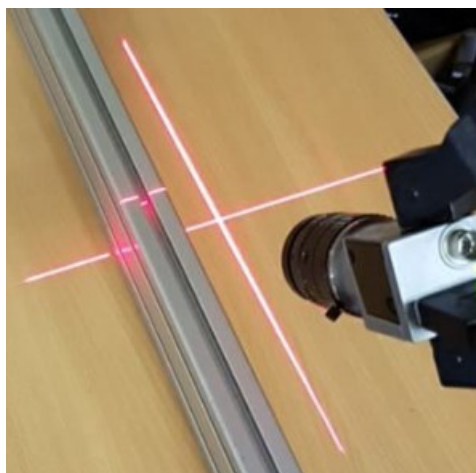
Realizace byla provedena v prostředí LabVIEW. Samotný proces je sestaven z funkcí pro dilataci, erozi, jenž tvoří předzpracování celé operace a následně výpočtu gradientu a lineární interpolace hodnot obrazu.



Obrázek 19: realizace výpočtu hloubkové stopy při triangulaci

6.2 Předzpracování

Pro otestování algoritmu na detekci laserové stopy, bylo využito hliníkového profilu, na který svítil červený laserový paprsek a černobílá kamera Bassler.



Obrázek 20: Snímáný předmět pro ověření triangulačních algoritmů.

Preprocessing je vykonání matematických operací nad obrazem, které modifikují jeho vlastnosti, jež jsou nežádoucí pro následné vyhodnocení. Příkladem je například snímání laserové stopy, které je rozostřené.



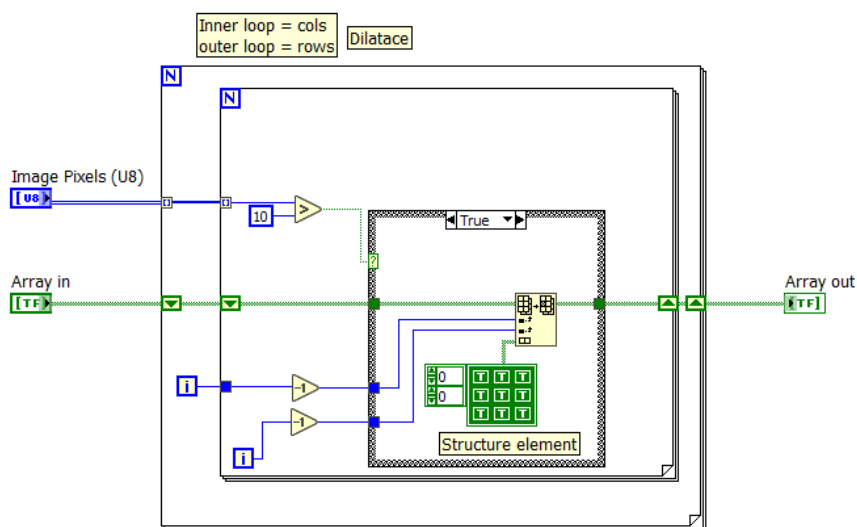
Obrázek 21: Získaný obrázek pro výpočet triangulace spolu s detailem laserové čáry

- **Prahování** – jedná se o funkci, která obecně upravuje hodnoty podle stanovené prahovací úrovně jasu v obraze. Pro případ binárního prahování platí následující rovnice, kde a reprezentuje hladinu prahu.

$$g(m,n) = \begin{cases} 0 & f(m,n) < a \\ 1 & f(m,n) > a \end{cases} \quad (26)$$

- **Dilatace** – Společně s operací eroze spadají do skupiny matematických morfologií. Jedná se o operátor, který slučuje podmnožinu z Euklidova prostoru, v našem případě podmnožinu obrazu $f(x,y)$, spolu s strukturním elementem S . Operace je zapsaná následovně.

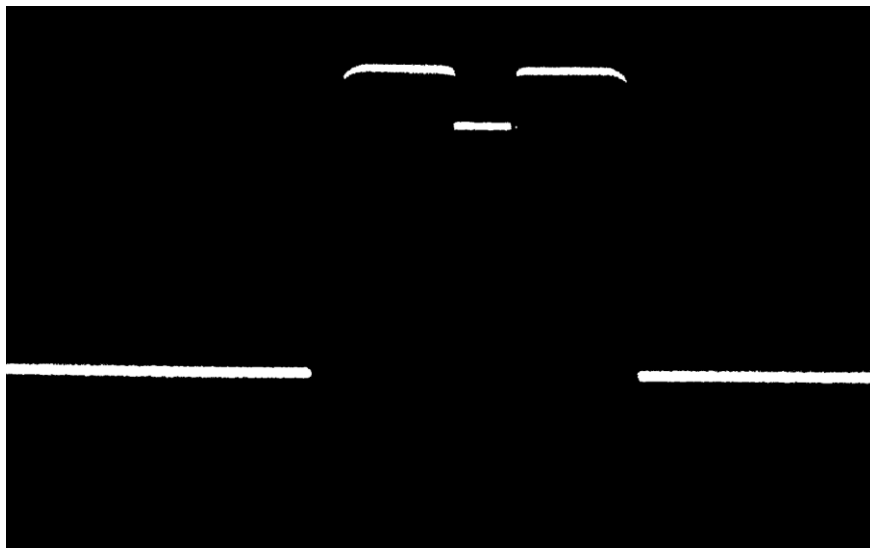
$$B \oplus S = \{f_S(m,n) | s_{m,n} \cap B \neq 0\} \quad (27)$$



Obrázek 22: Algoritmus Dilatace v programovém prostředí LabVIEW

- **Eroze** – Operace podobná dilataci. Na rozdíl od dilatace nepřisazuje výslednou hodnotu v případě že se aspoň jeden element průniků dvou množin B a S rovnají, ale pouze v případě, že se všechny elementy průniku těchto dvou množin rovnají. Operaci popíšeme následovně.

$$B \ominus S = \{f_s(m, n) | S_{m,n} \in B\} \quad (28)$$

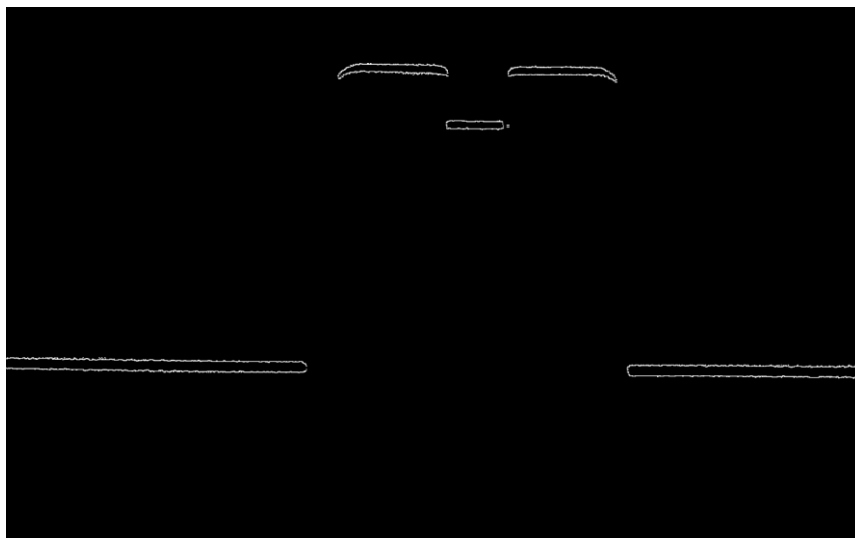


Obrázek 23: Výsledek po předzpracování obrazu

- **Výpočet gradientu** – Pro výpočet gradientu v Y ose obrazu, bylo využito Prewittova operátoru. Tento operátor počítá derivaci v směru os x,y jako průměr následujících pixelů.

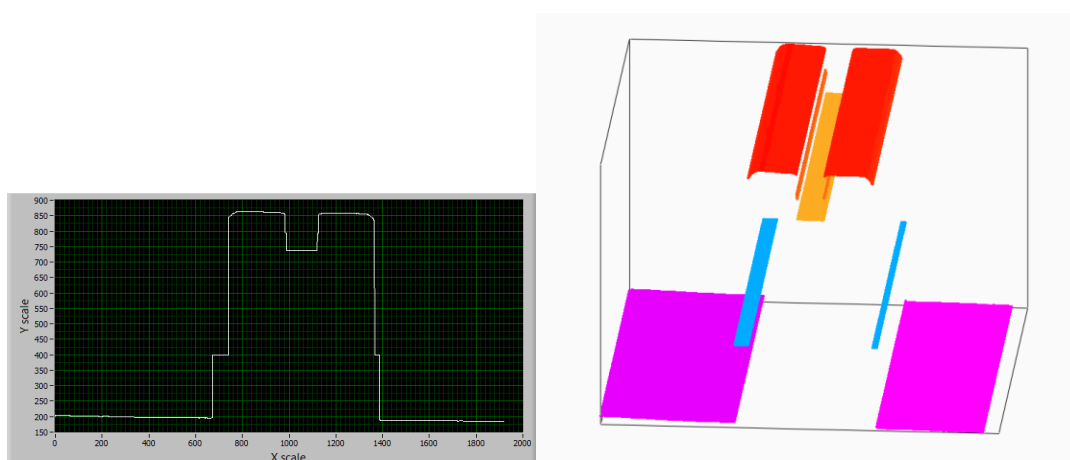
$$\frac{df(m, n)}{dy} = \sum_{i=-1}^1 f(m + i, n - 1) - f(m + i, n + 1) \quad (29)$$

Výše zmíněný postup zároveň využívá vlastností Fourierovy transformace, kterou zjednodušuje na operaci Konvoluce. Taktéž přispívá k redukci šumu v obraze a slouží jako základní hranový detektor.



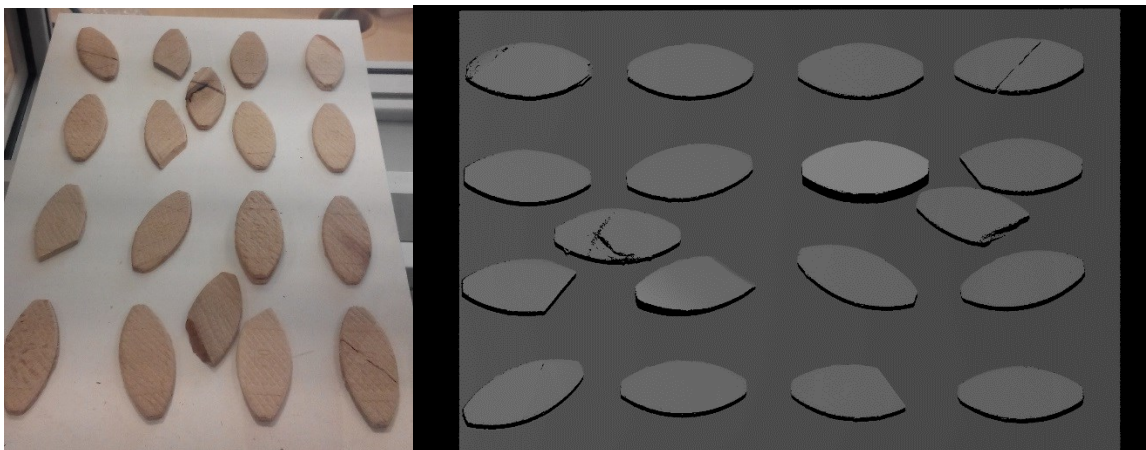
Obrázek 24: Výpočet gradientu v Y ose obrazu

- **Lineární interpolace** – Jedná se o metodu prokládání křivek za použití polynomiálních mnohočlenů. Jedná se o metodu numerické analýzy. Pro nalezení bodů v obraze byly procházeny jednotlivé sloupce obrazu, v obou směrech, a nalezen první výskyt hrany. Tím dojde k detekování horní a dolní hrany laserové stopy. Jeho výsledná výška předmětu, či terénu, je dále vypočtena jako střední hodnota těchto dvou průniků.



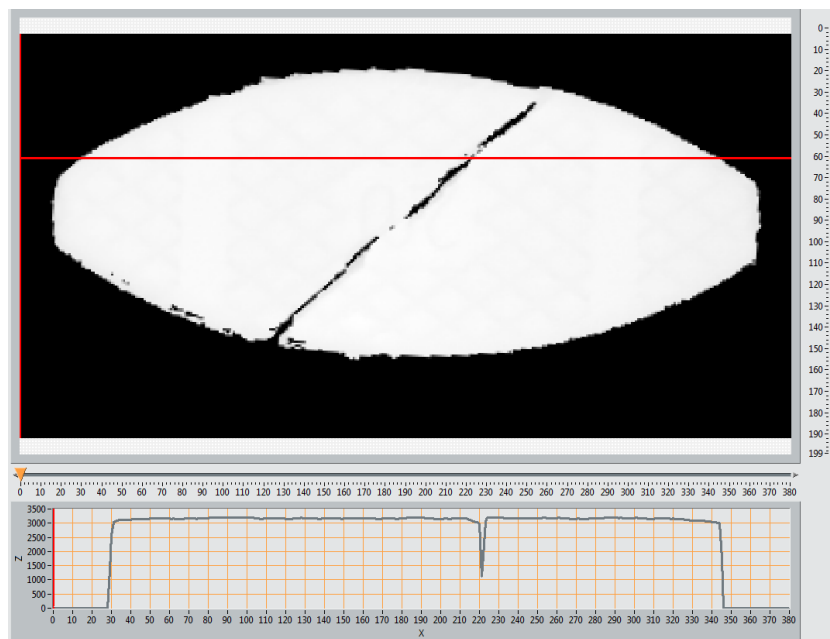
Obrázek 25: Výškový profil triangulace pro jeden obrázek a v 3D prostoru

Pro další testování už bylo vytvořeno testovací prostředí, které obsahovalo různě vysoké předměty, a proces triangulace byl spolu s těmito algoritmy automatizován v prostředí LV. Snímané hodnoty nebyly v tomto případě hodnotami binárními, ale díky velkému rozlišení kamery se přistoupilo k přesnosti definované U16.



Obrázek 26: Obrázek snímané scény spolu s získanou hloubkovou mapou.

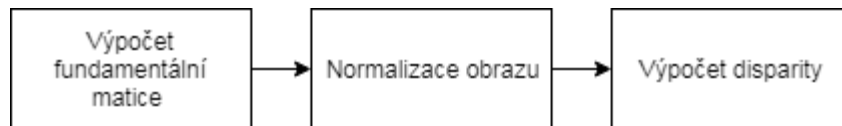
Spolu s algoritmem pro získání výškového profilu, byl do aplikace implementován i vizualizační panel, který umožňoval vykreslení výšky snímaného předmětu v 2D řezu předmětu.



Obrázek 27: Obrázek vykreslení výškového profilu snímaných předmětů

7 Praktické provedení stereometrie

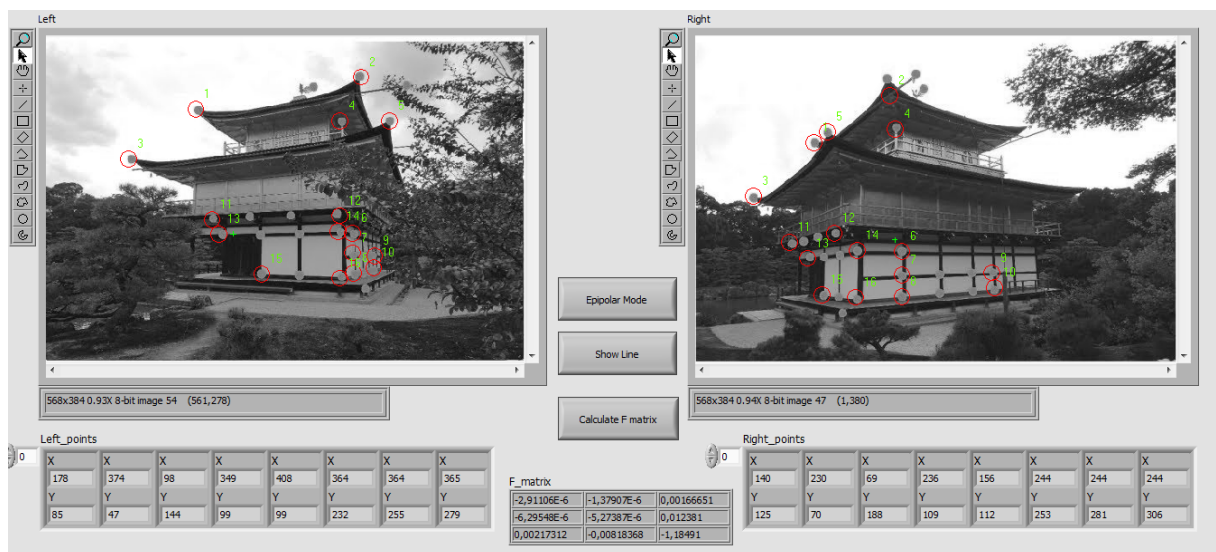
Pro praktické provedení bylo použito vývojové prostředí LabVIEW. Jedná se o grafické programovací prostředí. Pro zpracování obrazu byla využita knihovna Vision Aquisition IMAQ. Tato knihovna byla primárně použita pro načtení obrázku a převedení obrázku na pole, veškerá výpočetní matematika již byla provedena na bázi základních funkcí pro práci s poli.



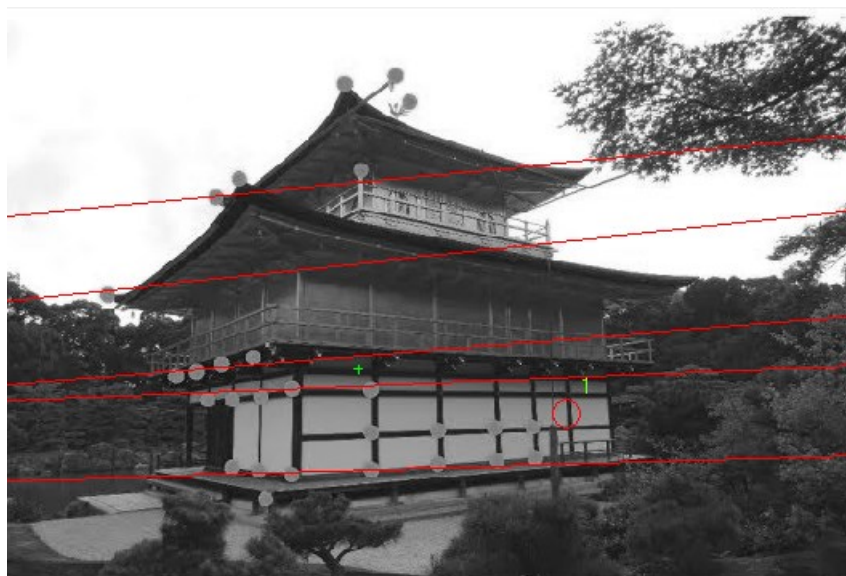
Obrázek 28: Diagram výpočtu stereometrie

7.1 Výpočet fundamentální matice

Pro výpočet fundamentální matice bylo potřeba implementovat uživatelské rozhraní, kde je uživatel schopen přepínat mezi nastavením bodů pro výsledný výpočet, a možností zobrazit vypočtenou Epipolární linii.

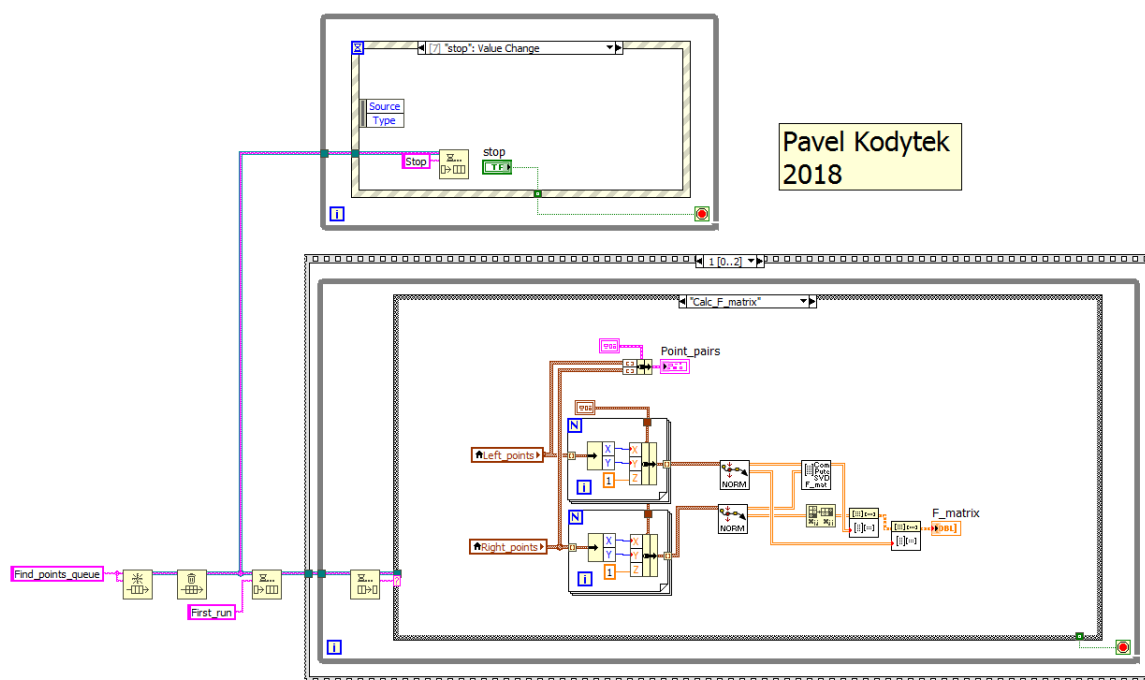


Obrázek 29: Vytvoření korespondujících bodů v obrazech



Obrázek 30: Zobrazení epipolárních linií

Pro plynulý běh uživatelských událostí a zároveň přiřazení patřičného výpočetního prostoru pro matematické úlohy byla zvolena komunikační struktura na bázi systému s frontami a se dvěma paralelně běžícími procesy na bázi producent-konzumer.



Obrázek 31: Blokový diagram aplikace pro výpočet fundamentální matice

7.2 Výpočet disparity

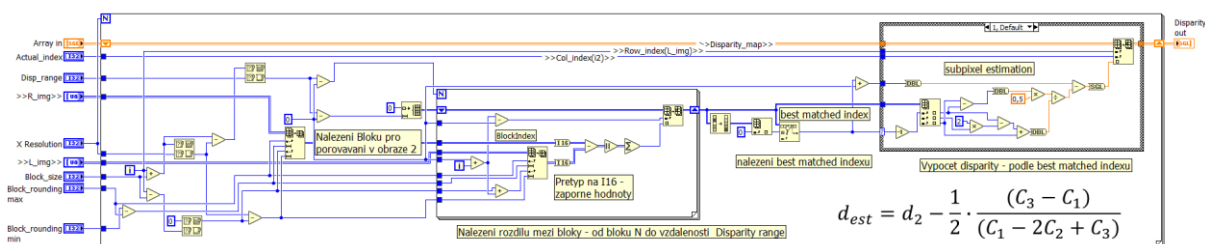
Pro ověření matematických modelů výpočtu disparity byly nejprve zvoleny cvičné snímky, jež jsou součástí Middlebury datasetu [25]. Tyto snímky jsou zároveň součástí celosvětové soutěže o nejlepší algoritmizaci daného problému.



Obrázek 32: Referenční snímky pro pravou a levou kameru

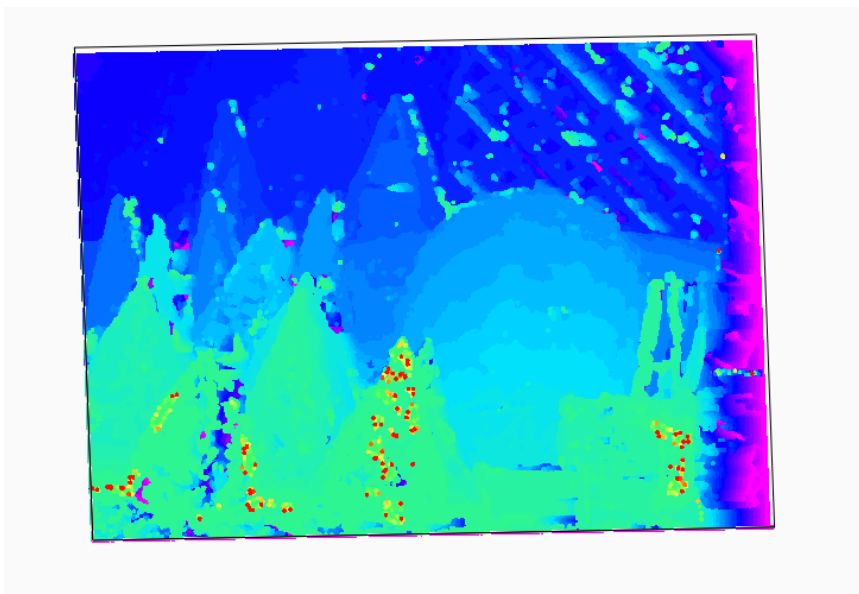
7.2.1 Block matching

Pro realizace základní funkce block matchingu byla v LabVIEW vytvořena funkce, která pro jeden pixel vytvoří hledaný blok v druhém obraze, a postupně iteruje nad dílčími posuny v prvním obraze. Tento algoritmus zároveň implementoval subpixelovou přesnost nalezené úrovně, a vracela celkové pole disparit. Vstupními parametry do algoritmu jsou inicializované, či již parciálně vypočtené pole disparit, aktuální počítaný index, maximální vzdálenost, přes kterou počítáme (tento parametr určuje výpočetní komplexnost algoritmu – čas), pravý a levý obrázek spolu s jejich rozlišením a zároveň velikost bloku spolu se zaokrouhlenými hodnotami bloků.



Obrázek 33: Realizace základní výpočetní matematiky pro interní určení Block Matchingu jednoho pixelu z celého obrazu.

Na obrázku 34 je výsledek block matching metody, založené na SAD, s parametry maximální disparity 50, a velikostí okna 7. Do obrazu jsou stále zaneseny artefakty, které tato metoda bez smoothing algoritmu nebyla schopna filtrovat. Artefakty se projevují především na přechodech mezi objekty.



Obrázek 34: Výsledek block matching algorytmu

7.2.2 Block matching jako energetická funkce

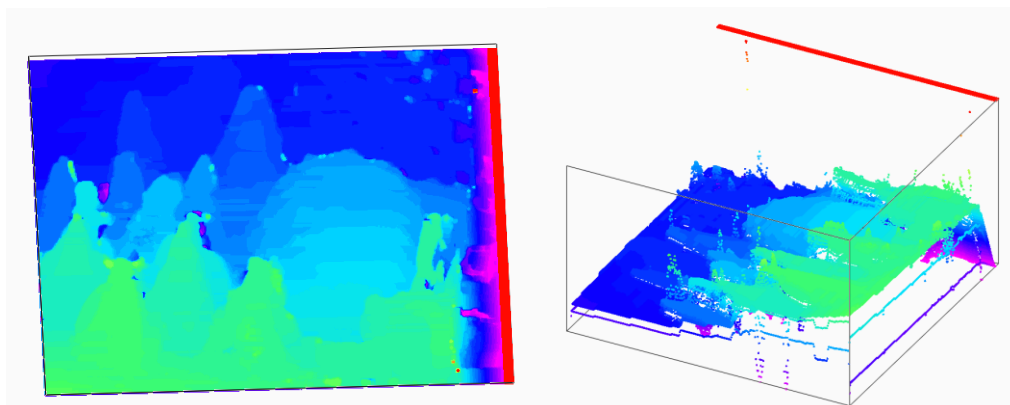
Energetická funkce je matematický popis obsahu „informace“. V teorii zpracování informace odpovídá energetická funkce hodnotě odmocniny z kvadrátu hodnoty signálu, obvykle měřené s ohledem na globální střední hodnotu. Energie v obecném pohledu je velmi otevřený pojem, který se používá k popisu jakékoli uživatelem definované funkce. Jednou z možností, jak definovat tuto veličinu v obraze, je použití vodivosti mezi dvěma pixely.

$$c_{A_{i,j}}^t = g(||\nabla_A I_{i,j}^t ||) \quad (30)$$

Kde A reprezentuje množinu směrů, obvykle z anglického pojmenování $A=\{N,S,E,W\}$ a g je definováno následující funkcí. Sigma ve vzorci pro výpočet g reprezentuje koeficient zkosení vodivostní funkce.

$$g(\nabla I) = e^{(-\frac{|\nabla I|^2}{\sigma^2})} \quad (31)$$

Blok matching s využitím energetické funkce na rozdíl od standartního block matchingu přidává smoothing faktor. Ten již filtruje artefakty které u klasické metody tvořili body maximální disparitní hladiny na přechodech mezi předměty.



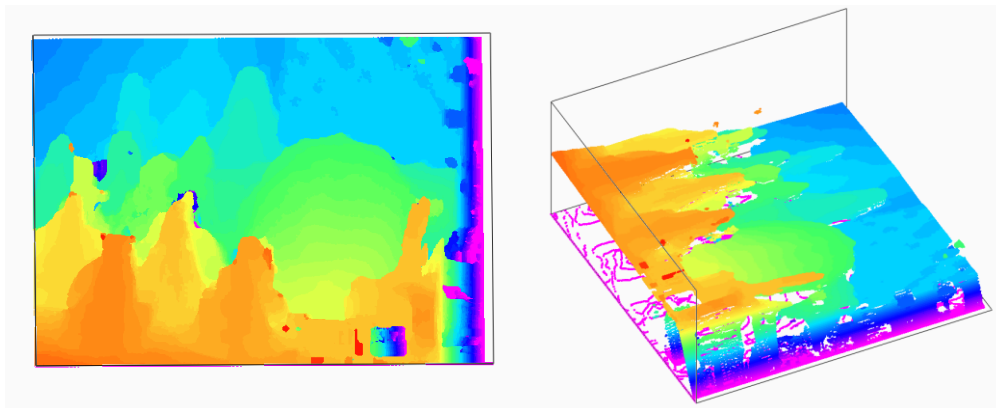
Obrázek 35: Block matching jako energetická funkce

Minimalizace energetické funkce je problém slučující mnoho vědních oborů. Je často využíván například v molekulární chemii, kvantové fyzice nebo biologii. V těchto vědních oborech se jedná o nalezení minimální hodnoty tak, aby postavení atomů a molekul bylo podle známých pravidel, pokud možno neoptimálnější, tedy aby výsledné energetické hladiny byly blízké nule. Pro teorii zpracování obrazu je tohoto využito tak, že každému pixelu v obraze hledáme takovou energetickou hladinu, aby postavením pixelu do prostoru vznikaly minimální ztráty energie.

7.2.3 Graph cuts

Segmentace grafu slučuje předměty dohromady, a zanáší určitou pravděpodobnostní funkci pro dohledání pixelu spadajícího k jednotlivým objektům. Na rozdíl od předchozích metod ale dojde k „rozostření“ objektů a je zanesena velká odchylka do pozadí objektu, které bylo například u jednoduchého block matchingu stále rozpoznatelné.

Graph cut algoritmus je jedním z možných algoritmů, použitelných pro vyřešení širokého spektra nízko úrovněových operací při zpracování obrazu, jako je například vyhlazení obrazu, segmentace obrazu nebo nalezení korespondence. Mnoho těchto minimalizací může být založeno na zpracování energetické funkce. Na rozdíl od pouhé minimalizace se jedná o přiřazení funkce do určitého „bodu“ se specifickou vlastností. Hledáme tedy maximální průtok energie možný daným bode, a na jeho základě vkládáme pixel do dané vzdálenostní úrovně.



Obrázek 36: Výsledek algoritmu založeném na graph cuts segmentaci

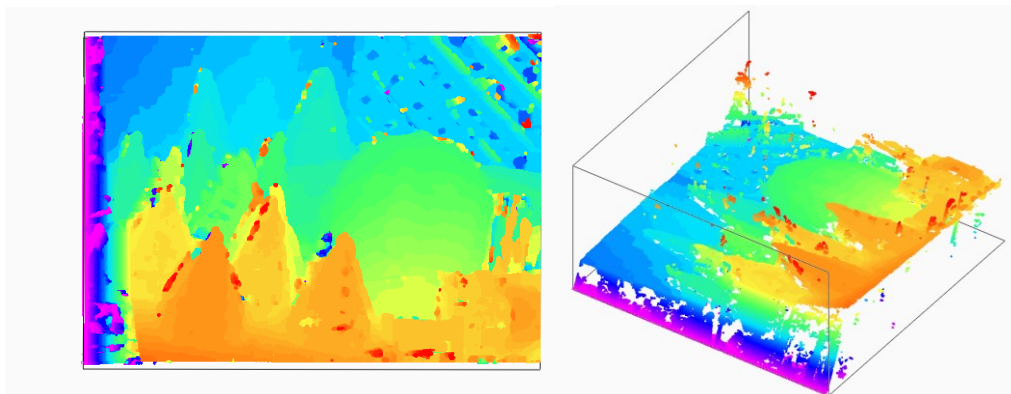
7.2.4 Dynamické programování

Dynamické programování je odvětví optimalizace, a umělé inteligence pro nalezení optimálního řešení v iteračním procesu. Hlavní myšlenkou je rozložení celkového řešení na dílčí problémy, které jsou řešeny a jejich výsledky jsou poskytnuty do další iterace.

Z teorie umělé inteligence by se dal problém popsat jako využití vlastností MDP (Markov Decision Process) založených na Belmanově rovnici (podle R. Ballmana), která nám říká že aktuální stav systému v čase t , je závislý pouze na stavu systému v čase $t-1$, kde postupně snižujeme získanou odměnu v procesu. Matematicky to lze vyjádřit pomocí rovnice:

$$V(s) = \max_a (R(s, a) + \gamma \sum_{s'} T(s, a, s') V(s')) \quad (32)$$

Hodnota v stavu s , je daná jako nalezení maxima přes všechny možné akce při očekávané odměně se zohledněním všech následujících předpokládaných stavů. V jednoduchém srozumitelném příkladu můžeme tuto rovnici interpretovat tak, že robot pohybující se v prostoru si vybere ten směr, kde očekává největší možnou odměnu za jeho provedení. Jedná se o problematiku umělé inteligence a samoučících se algoritmů, kde odměňujeme počítač v závislosti na provedené činnosti.

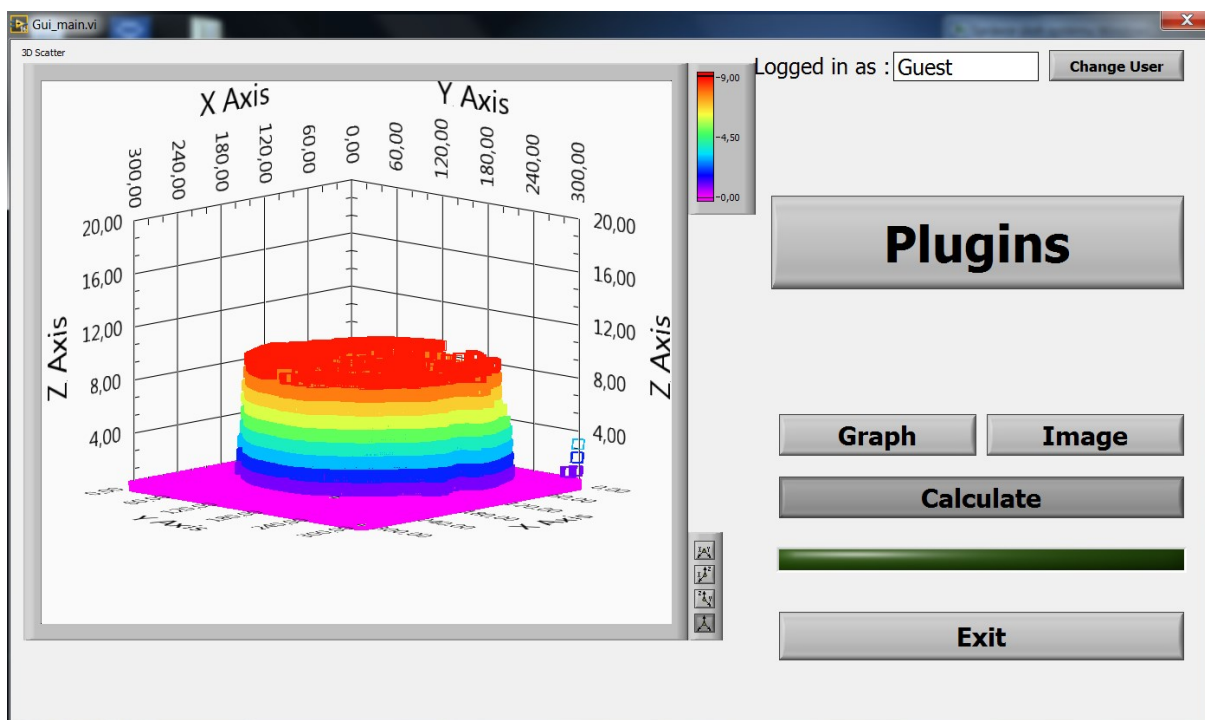


Obrázek 37: Výsledek dynamického programování

7.3 Finální realizace

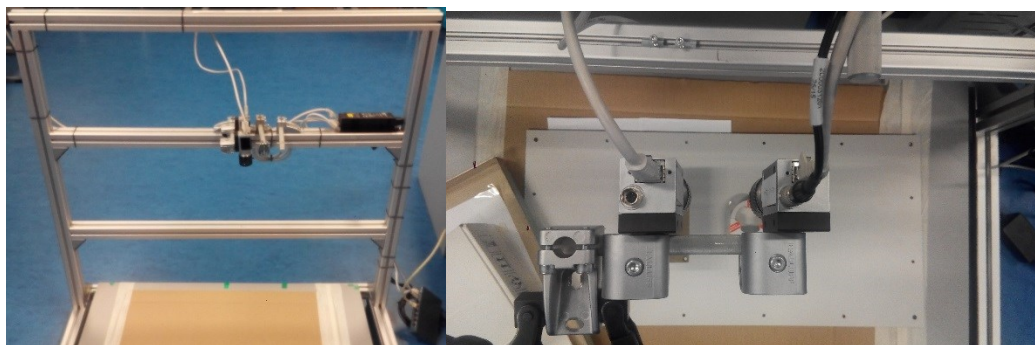
Pro finální realizaci bylo použito aplikace, kterou jsem vytvořil v rámci své bakalářské práce, a která měla realizovat platformu pro strojové vidění. Jedná se o framework, který má již předpřipravené programovatelné funkce, a jenž samostatně zajišťuje chod aplikace. Pro účely mé diplomové práce jsem modifikoval zobrazovací elementy grafického rozhraní a implementoval zobrazovací jednotku pro 3D graf. Aplikace již v sobě obsahovala kamerový server (komunikační jednotku pro práci s kamerami), a tedy nebylo nutné zdlouhavé implementace těchto softwarových komponent.

Jelikož se jedná o modulární platformu, součástí mé DP bylo dotvoření modulu, který počítal 3D profil z získaných snímků. Jedná se o plugin, který byl do aplikace následně vložen, a jeho klíčový algoritmus sestával z bloků popsaných výše. Konkrétně se jednalo o normalizaci obrazu v 3D prostoru, a následně o výpočet disparity nad rektifikovanými obrazy.



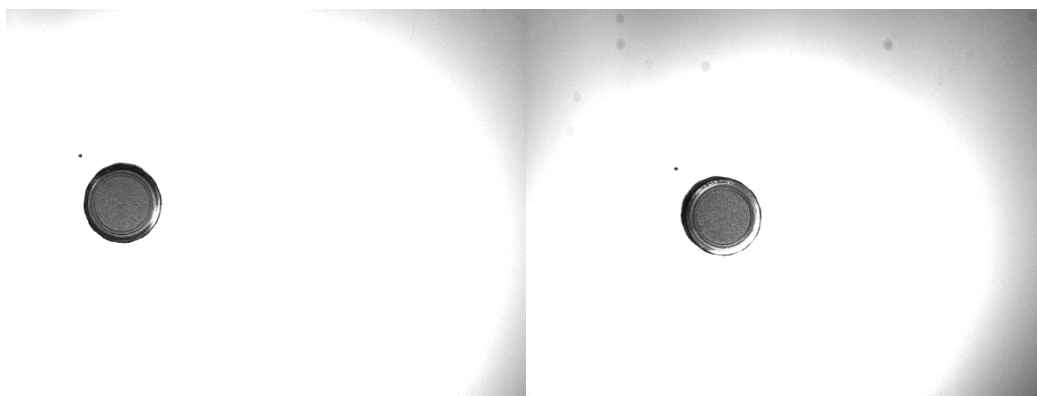
Obrázek 38: Aplikace platformy pro strojové vidění, přizpůsobené k zobrazení 3D grafu ze stereometrie

Pro získání snímků byly použity dvě černobílé kamery Bassler, které byly umístěny na konstrukci z hliníkových profilů Item, a umístěny pod úhlem. Součástí řešení bylo v případě špatných světelných podmínek taktéž přidavné osvětlení, jenž bylo umístěno tak, aby bylo kolmo k pozorovanému předmětu.



Obrázek 39: použitá konstrukce pro stereometrii

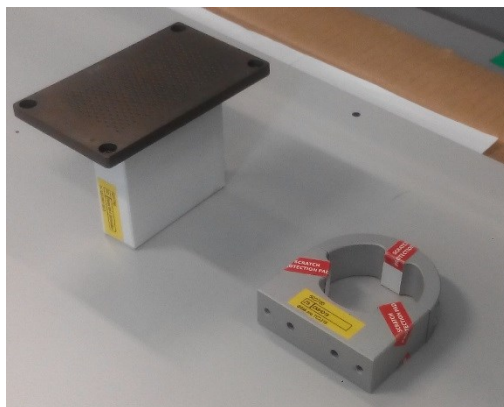
Za sledovaný objekt pro jednoduchost byla zvolena krytka kamery. Jedná se o předmět s kruhovou podstavou, a rovnoměrnou výškou. Pro ověření funkčnosti se jedná o vhodný předmět. Výsledek 3D projekce je již zobrazen na hlavní obrazovce frameworku na obrázku 38, a k dopočtení těchto výsledků bylo použito algoritmu graph cuts, spolu s provedením kalibrace, která vedla k výpočtu fundamentální matice pro rotaci obrazu. Zároveň došlo k ořezání efektivní pracovní oblasti na oblast v okolí sledovaného předmětu.



Obrázek 40: Levý a pravý snímek získaný z kamer v binokulárním postavení

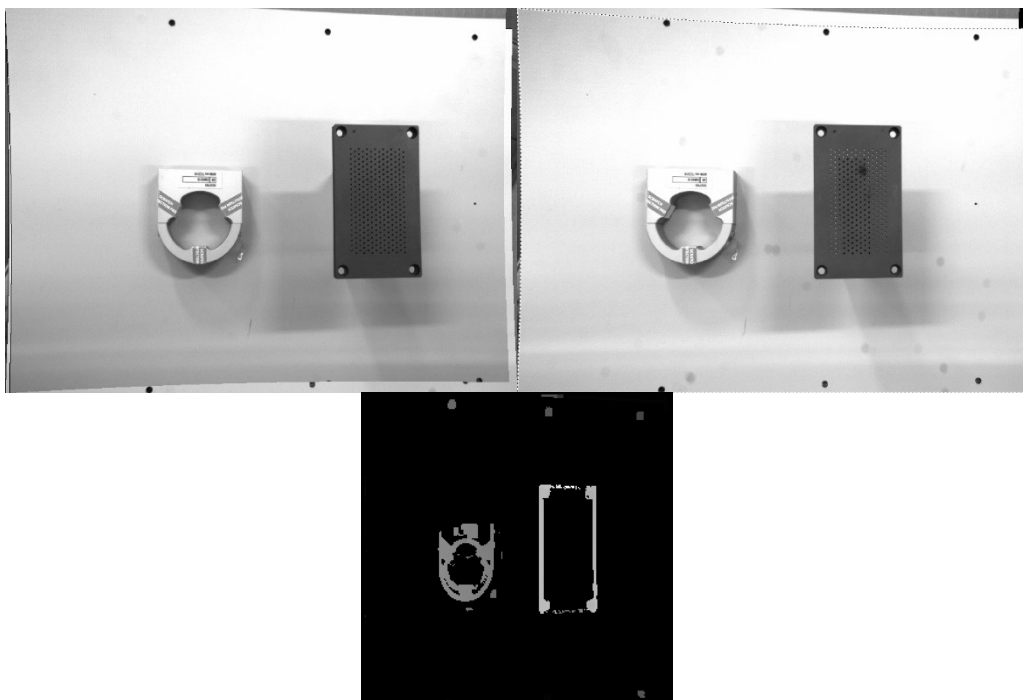
Pro následující pokus byla již zvolena složitější scéna, kde docházelo k porovnání předmětů různých výšek. Pro tento postup byl zároveň vytvořen kalibrační program, který byl napsaný v prostředí Halcon³. Tento program vytvářel rektifikované snímky na základě určení epipolárních linií.

³ Software společnosti MVTec, který dodává funkce pro zpracování obrazu, se zaměřením na 3D geometrie s použitím GPU procesorů. Optimalizace kódu je provedena za maximalizací výkonu.



Obrázek 41: Pozorovaná scéna

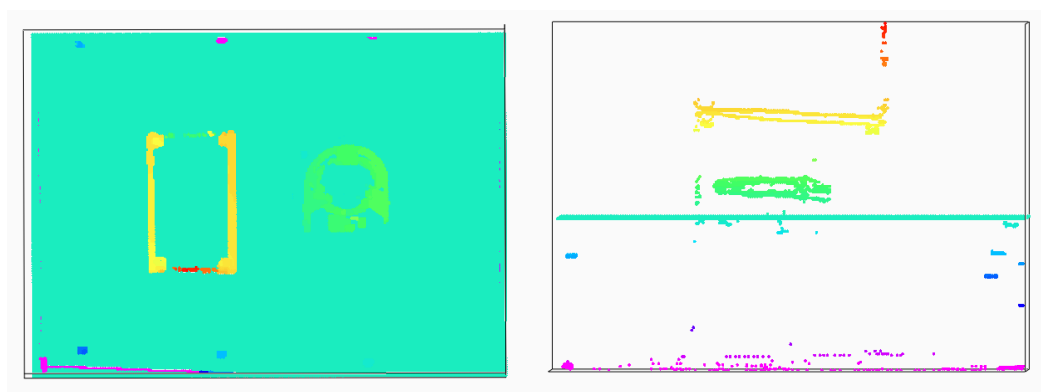
Rektifikovaný snímek je snímek, kde se jednotlivé body nacházejí na ekvivalentních horizontálních liniích. Jelikož se zároveň jednalo o zachovaný obrázek o velikosti 800x600 pixelů, nebylo výpočetně praktické provádět výpočty nad tak rozsáhlou oblastí jinak než pomocí průchodu řádky.



Obrázek 42: Levý a pravý snímek pořízený z kamer po rektifikaci spolu se získanou hloubkovou mapou.

Výsledek byl následně převeden do 3D grafu, kde byl zobrazen z čelního pohledu. Na obraze jde vidět, že algoritmus vyhladil a zanedbal většinu nespojitostí v pozadí, a soustředil se na posuny hran. Tyto posuny jsou způsobeny výškou předmětů, a díky počtu pixelů které určují posunutí mezi levým a pravým obrazem jsme schopni tuto výšku spočítat. V bočním pohledu je tento rozdíl mezi dvěma

různě vysokými předměty vyobrazen, a zároveň je zde viditelné mírné zkosení předmětů. To je způsobeno algoritmem procházení obrazu, který vždy bere jednu stranu jako dominantní.



Obrázek 43: Projekce reliéfu do 3D grafu z čelního a bočního pohledu

8 Porovnání metod

Porovnání metod bylo provedené na základě subjektivního pohledu autora. Metody se liší především ve svých specifických případech použití, a tedy pro konkrétní úlohu je vždy jedna metoda lepší než ostatní. Zásadním parametrem, který určuje možnost použití triangulační metody, je, zdali je předmět v pohybu. Na malé vzdálenosti vykazuje tato metoda velmi dobrých výsledků.

Tabulka 1: Srovnání metod

Metoda	Komplexnost výpočtu	Pohybující se předmět	Počet kamer	Vhodné vzdálenosti	Hranová detekce
3D kamera	čas letu	NE	1 speciální	Střední až velké	Ano *
Triangulace	Velikost obrazu	ANO	1	Malé až střední	Ano *
Stereometrie	(Velikost obrazu) ^N	NE	2+	Malé až Velké	NE

* - Pokud to dovoluje mechanické provedení a fyzikální principy. Je-li sledovaný objekt umístěn tak, že dopadající paprsek světla či laseru je od hrany odražen mimo zorné pole kamery, nelze tuto hranu detekovat.

V případě statického předmětu uvažujeme o využití 3 D kamery, která má ovšem principální problém s malými předměty. To je dáno potřebnou dobou integrace mezi jednotlivými úrovněmi hloubky scény, jež jsou při použití rychlosti světla velmi malé, a tedy obtížně měřitelné. Tuto vlastnost lze u stereometrie potlačit ohniskovou vzdáleností objektivů, tak, aby sledovaný předmět byl v optickém středu soustavy. Měření doby letu je tedy díky poměrně velkému rozptylu hloubkových úrovní vhodné pro velké předměty, potažmo prostory jako je například místnost.

Při určení metody taktéž závisí na sledovaném povrchu. Ze stejného důvodu, jak může být obtížné detekovat hrany ToF kamerou, může být problémové provedení laserovou triangulací v případě, že předmět odráží laser do prostoru, nebo dojde k nevhodnému zvolení laseru. V takovém případě je laserový paprsek pohlcen objektem (červený laser na červený podklad).

Další možností špatného zvolení metody, je provedení stereometrie na scénách, které obsahují singulární body. Může se jednat například o zkreslení scény, které se nazývá zkreslení paralaxy. Tento jev jsme schopni simulovat za použití lidského těla tak, že si zavřeme jedno oko a umístíme vztyčený palec na natažené ruce tak, aby nám zakrýval libovolně zvolený předmět v dálí. V moment, kdy při nezměněné pozici otevřeme druhé oko, a zavřeme první, dojde k posunutí palce vůči předmětu v dálí. Tento jev je primárně spojený s pozorováním hvězd, ale hraje nemalou roli při výpočtu stereometrie. Jinými slovy, nevidíme-li předmět na jednom obraze, nejsme schopni určit jeho vzdálenost v obraze druhém.

Jiným z mnoha možných singulárních bodů může být umístění předmětů tak, že pravé oko vidí předměty A a B v abecedním pořadí, a druhá kamera v pořadí opačném. Toto může mít za následek zanesení zkreslení do výpočetních algoritmů.

Určení doby výpočetní složitosti dílčích metod.

Pro určení doby trvání výpočtu jednotlivých metod se zaměříme primárně na množství iterací spojených s určením jednotlivých kroků. Výsledek dále normalizujeme pro obrázek o velikost 1920*1080 (Full HD), který je černobílý a budeme počítat s jedno-vláknovým výpočetním procesem (potlačený multithreading a bez paralelizace procesů), který bude vypočítán na procesoru s rychlostí 2 GHz. Ve výsledku zohledníme převod klasické instrukce v programovacím prostředí LabVIEW na strojovou instrukci v poměru 1:3 (tři strojové instrukce na jednu operaci v LabVIEW).

ToF kamera

V teoretické rovině je doba sejmutí snímku pomocí výpočtu doby letu dána pouze dobou letu samotného světla k předmětu, jeho odrazem a dobou letu zpátky k objektivu. Pro mnou použitou kameru byla maximální pracovní vzdálenost třináct metrů. Celkovou dobu můžeme tedy snadno spočítat:

$$t = \frac{s}{v} = \frac{26}{\frac{300\,000\,000}{3600}} = 3,12 * 10^{-4} \text{ (s)} \quad (33)$$

Triangulace

Pro jeden snímek triangulace je výpočet komplexity již mírně komplikovanější. Uvažujme tedy že triangulační algoritmus je složený z gradientní metody hledání hrany založeném na dvou konvolucích, následném součtu dvou obrázků a na samotné detekci hrany. Pro korektnost výpočtu si nejdříve odvodíme samotné dílčí úlohy procesu.

Konvoluce je dána následujícím vztahem:

$$(f * g)(m, n) = \sum_{i=-k}^k \sum_{j=-k}^k f(m-i, n-j) g(m, n) \quad (34)$$

Jsme schopni určit výpočetní složitost této operace na $9MN^4$ pro konvoluční masku velikosti 3 pixel. Tato konvoluční maska je dostatečná pro detekci hrany například podle Sobela. Koeficienty M a N udávají celkový počet pixelů v dimenzích obrazu.

Pro součet dvou obrazů platí, že výpočetní náročnost je MN. Jedná se o jednu operaci nad každým pixelem obrazu. A obdobně jsme schopni odvodit detekci hrany, která je založena na dvojím projití každého sloupce, a to od vrchní hrany a následně od spodní hrany obrazu. Jedná se o celkový počet operací daný vztahem 2MN.

Výsledná výpočetní doba jednoho obrázku triangulace je pak dána vztahem:

$$\begin{aligned} t &= [2(M * N) * 9 + M * N + N(2 * M)] * Rychlost \\ &= 21(M * N) * Rychlost \\ t &= [21 * (1920 * 1080)] * \frac{3}{2^{30}} = 0,12 \text{ s} \end{aligned} \quad (35)$$

⁴ MN – celkový počet pixelů v obraze

Při odvození této doby ale nesmíme zapomenout, že výpočet triangulace nad jedním obrázkem, není finální čas výpočtu prostorového reliéfu. Pro korektní výpočet můžeme uvažovat například použití 100 snímků či více. Zároveň může tato metoda narazit na mechanické problémy, jako je například maximální rychlost lineárního posunu. Je-li mechanicky možné urazit s předmětem požadovanou trajektorii nejrychleji za 30 vteřin, nemůže celková doba výpočtu být nižší než tato limitace.

Stereometrie

Pro stereometrii budeme uvažovat obdobným způsobem jako při triangulaci. Projdeme každý pixel v celkovém obrazem o velikost MN, a pro každý pixel spočítáme jeho funkci pro určení disparitní hodnoty. Procházíme tedy d úrovní disparit, a určujeme okno o velikosti Bs pixelů čtvercového formátu. Celkovou dobu výpočtu pro velikost okna 7 pixel a maximální hloubku disparity 50 u stereometrie určíme následovně:

$$t = MN * [d * B_s^2 + d] * rychlost = MN[d * (B_s^2 + 1)] * rychlost \quad (36)$$

$$t = 1920 * 1080 * [50 * (7^2 + 1)] * \frac{3}{2^{30}} = 14,48 \text{ s}$$

Závěr

Cílem mé diplomové práce byla implementace metod pro snímání 3D objektů. Tyto metody se dělí na ty, které využívají fyzikálních principů, a na metody založené na principech a numerických metodách strojového vidění.

Time of Flight (ToF) kamera, která je založena na nepřímém měření vzdálenosti, jako měření doby letu světla, se od zbylých testovaných metod liší. Její síla je především ve velké rychlosti, která je dána vysokou rychlostí světla. Díky tomu je kamera schopna pořídit obrázek reliéfu terénu za dobu menší než setina sekundy. Tato kamera má díky svým vlastnostem ale omezenou rozlišovací schopnost, protože je obtížné měřit čas extrémně přesně. Zároveň se kamera potýká se stejnými fyzikálními principy optiky, které znemožňují kameře měřit místa, od kterých se světelný paprsek neodrazí zpátky do objektivu kamery. To může být pozorováno například na hranách vzdálených předmětů nebo na lesklých odrazivých plochách.

Dále byly zkoumány metody stereometrie a triangulace. Obě metody jsou zaměřeny na zpracování obrazu, případně více obrazů, a porovnání klíčových vodítek. Pro triangulaci je nosnou informací stopa laseru promítána do prostoru a pro stereometrii se jedná o vzájemnou korelaci dvou pixelů v obraze pořízených z kamer v stereometrické soustavě. Obě metody jsou založeny na matematické analýze obrazu, a proto je úvodní kapitola věnována matematickému popisu a odvození těchto postupů.

Při řešení triangulace je algoritmus pro hledání laserové stopy v obraze díky metodám jako je dilatace a eroze, schopen vyhladit jinak nedokonalou stopu laseru. Vyhlazení zároveň nevznáší statisticky významné zkreslení do celkového výsledku. Následujícím krokem je detekce hrany, které jsou poté vyhodnoceny a pomocí lineární interpolace je vytvořen výškový profil předmětu v řezu. Tato metoda již není časově tak efektivní jako ToF kamera, a vyžaduje předmět, který se pohybuje, případně pohyblivou optickou soustavu.

Požadavek na pohybující se předmět je možné využitím metody stereometrie, která na rozdíl od triangulace nepoužívá jako charakteristické vodítko stopu laseru, ale jelikož se jedná o snímání objektu dvěma kamerami, jde o nalezení vzájemné korelace mezi pixely v levém a pravém obraze. Před samotným vyhodnocením je nutné provést rektifikaci obrazu, která je matematickou transformací obrazu podle fundamentální matice. Tato matice je maticí afinní transformace, která je vypočtena při kalibraci kamerového systému.

Pro samotný výpočet vzdálenosti předmětů, se využívá výpočtu takzvané disparity. Jedná se o hodnotu informace, která je definovaná jako počet pixelů, o které je předmět posunut mezi levým a pravým snímkem. Pro zjištění této informace se používají globální, nebo semiglobální algoritmy. V kapitole o výpočtu disparity procházím jednotlivá řešení, která byla implementována v programovém prostředí LabVIEW, které spolu s mou bakalářskou prací bylo zvoleno jako realizační

prostředí. Základní algoritmus Block Matchingu je postupně rozšiřován o vyhlazování případně je provedena segmentace obrazu na bázi teorie grafů.

Stereometrie ale také není vhodnou metodou pro všechny možné sledované scény. Je-li součástí scény singulární bod, který může být definován například vznikem paralaxy mezi kamerami tak, že jedna kamera nevidí stejné předměty jako kamera druhá, stává se algoritmus stereometrie nepřesným. Zároveň se jedná o výpočetně časově náročný algoritmus. Na rozdíl od triangulace je ale použitelný pro předměty, kde při sledování laserové stopy na předmětu může dojít k odražení laserové stopy do prostoru, a tedy ke kompletní ztrátě informace.

Samotných možností, jak určit 3D scénu prostoru existuje celá řada, a záleží tedy na specifickém případě použití, která z metod je nejvhodnější.

Seznam použité a studované literatury

- [1] Digitální obraz. *Wikiskripta* [online]. 12. 2. 2016 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Digitální_obraz
- [2] Time-of-flight camera. *Wikipedia* [online]. 28. 2. 2018 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Time-of-flight_camera
- [3] *3D Photography: Introduction to 3D Scanning* [online]. 28. 2. 2018 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://mesh.brown.edu/3DP-2012/pdfs/3DP-2011-lecture-2.pdf>
- [4] Optické metody měření 3D objektů. *Elektrorevue* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/index.html>
- [5] *Nineteen Ways to do 3-Dimensional* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: https://autovis.com/images/pdf/resources/3d_techniques.pdf
- [6] JECIĆ, Stjepan a Nenad DRVAR. THE ASSESSMENT OF STRUCTURED LIGHT AND LASER SCANNING METHODS IN 3D SHAPE MEASUREMENTS. 4th International Congress of Croatian Society of Mechanics [online]. 2003 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: <https://bib.irb.hr/datoteka/170686.p126.pdf>
- [7] KULÍKOVÁ, BARBORA. *VÝPOČET MAPY DISPARITY Z BAREVNÝCH STEREO SNÍMKŮ* [online]. Brno, 2016 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=126177. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Jan Klečka.
- [8] JANEČEK, MARTIN. *SOUSTAVA KAMER JAKO STEREOSKOPICKÝ SENZOR PRO MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI V REÁLNÉM ČASE* [online]. Brno, 2014 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=93086. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Jan Klečka.
- [9] *Perspective Transform* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://mrl.cs.vsb.cz/people/gaura/dzo/persp.pdf>
- [10] SOJKA, Eduard, Jan GAURA a Michal KRUMNIKL. *Matematické základy digitálního zpracování obrazu* [online]. 2011 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://mrl.cs.vsb.cz/people/sojka/dzo/mzdzo.pdf>
- [11] H. Hirschmüller, "Accurate and efficient stereo processing by semiglobal matching and mutual information," in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005, pp. 807–814.

- [12] R. Klette, N. Kruger, T. Vaudrey, K. Pauwels, M. van Hulle, S. Morales, F. Kandil, R. Haeusler, N. Pugeault, C. Rabe, and M. Lappe, “Performance of correspondence algorithms in Stereometry“
- [13] MATLAB Product Description. *Math Works* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: https://www.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html?requestedDomain=true&nocookie=true
- [14] Image Processing Toolbox: Perform image processing, analysis, and algorithm development. *Math Works* [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/image.html>
- [15] Real-time stereo vision based on the uniqueness constraint: experimental results and applications. *Computer Vision LAB* [online]. 12/2012 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: http://vision.deis.unibo.it/~smatt/stereo_smp.html
- [16] Stereo Vision Algorithms. *Machine Intelligence Laboratory* [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://mi.eng.cam.ac.uk/~cipolla/lectures/4F12/Slides/old/4F12-stereo-AB-1.pdf>
- [17] MATTOCCIA, Stefano. *Stereo Vision:: Algorithms and Applications* [online]. 12. 1. 2013 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://vision.deis.unibo.it/~smatt/Seminars/StereoVision.pdf>
- [18] Stereo vision. *Slide share* [online]. 2014 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/DngNguyn43/stereo-vision-42147593>
- [19] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN ISBN978-80-7300-245-9.
- [20] KULÍKOVÁ, BARBORA. *VÝPOČET MAPY DISPARITY Z BAREVNÝCH STEREO SNÍMKŮ*. Brno, 2016. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Jan Klečka.
- [21] HLAVÁČ, Václav a Milan ŠONKA. [i]Počítačové vidění.[/i] Praha: Grada, 1992. ISBN 80-85424-67-3.
- [22] ŠONKA, Milan, Václav HLAVÁČ a Roger BOYLE. [i]Image processing, analysis, and machine vision.[/i] 3rd ed. Toronto: Thomson, 2008, xxv, 829 s. ISBN 978-0-495-

z: <http://www.engineering.uiowa.edu/~dip/LECTURE/lecture.html>.

- [23] KULÍKOVÁ, BARBORA. *VÝPOČET MAPY DISPARITY Z BAREVNÝCH STEREO SNÍMKŮ* [online]. Brno, 2016 [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/44402257.pdf>. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Jan Klečka.
- [24] REKTORYS, Karel. *Přehled užití matematiky 1*. 7. vyd. Praha: Prometheus, 2000. ISBN 80-7196-179-5.
- [25] Vision Middlebury. *Http://vision.middlebury.edu* [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://vision.middlebury.edu/stereo/data/>
- [26] NGUYEN, Minh, Yuk HIN CHAN, Patrice DELMAS a Georgy GIMEL'FARB. Symmetric Dynamic Programming Stereo Using Block Matching Guidance. *2013 28th International Conference on Image and Vision Computing New Zealand* [online]. 2013, 88-93 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/samp.jsp?arnumber=6726997&tag=1>

Přílohy

Elektronická příloha na CD:

Software.zip

Obrazky.zip